GENERALITES SUR LA TRANSMISSION DES DONNEES

Document réalisé par :
M.MEZARI Rezak
Email : mezabdrezak@yahoo.fr



TABLE DES MATIERES

Un réseau n'est qu'un ensemble d'ordinateurs et de périphériques relie les uns aux autres dans le but d'échanger des données. Avant de nous lancer dans l'installation d'un réseau et ses principes de fonctionnement, pensons un moment aux processus de communication des données et aux types de signaux qui permettent aux ordinateurs d'émettre et de recevoir des données. Dans ce chapitre, nous allons présenter certains des termes et techniques utilisés dans la transmission de donnés sur différents types de réseaux. Pour cela nous avons commencé par un rappel sur la théorie du signal ayant trait avec les réseaux informatiques, ensuite nous traiterons la transmission des données, celle-ci sera complété par l'étude des supports de transmissions et de leurs caractéristiques, et des adaptations que doivent subir les blocs de bits émis à une extrémité de la voie pour être acheminés et reconnus à l'autre extrémité. Encore faut-il que cette transmission soit fiable et que l'interprétation des bits puisse se faire correctement.

1 Rappels de théorie du signal

Cette section rappelle sous forme concise, quelques résultats de la théorie du signal nécessaire à la compréhension de certains phénomènes relatifs à la transmission des données.

1.1. Notion du signal

Nous appelons *signal* toute variable ou source d'information évoluant en fonction du temps. Exemple : un signal s(t), en électronique est une tension v(t) ou un courant i(t).

Lorsque l'amplitude d'un signal est connus ou peut être déterminé à chaque instant, le signal est dit *déterministe*[1]. Dans le cas où seul une information de nature statistique, telle la probabilité d'avoir une amplitude donnée à un instant donnée, le signal est dit *aléatoire*. L'aspect aléatoire apparaît essentiellement aux niveaux des bruits (parasites).

Un signal s(t) peut aussi se présenter sous différentes formes, selon que son amplitude est une variable continue ou discrète (quantifié)[2] et sa variable indépendante ' t ' est continue ou discrète (signal échantillonnée).

Signal analogique et numérique :

Dés qu'il s'agit de communication de données, le terme signal *analogique* et *numérique* revient constamment.

Analogique : Dans un signal analogique, tel que celui en usage pour la diffusion radio et TV, les informations voyagent sous forme d'onde continûment variable. Comme le montre l'illustration suivante.

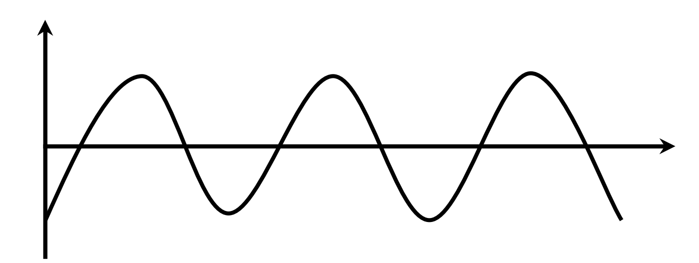


Figure 1.1 Exemple de signal analogique

[1] Un signal déterministe est généralement dénoté s(t), $t \in \Re$.
[2] Ne peut prendre que des valeurs bien déterminées, c'est le cas des signaux numériques.

Numérique : lorsque on a affaire à des signaux numériques, on est en face de signaux plus simples, dans la mesure où les informations circulent au moyens d'impulsions discrète (Activé/Désactivé) sur un medium de communication. Par exemple, du courant peut être envoyé sur le fil électrique pour transmettre un '1' binaire, et l'absence de courant équivaut à un '0' binaire. Un signal numérique ressemble à l'illustration suivante.

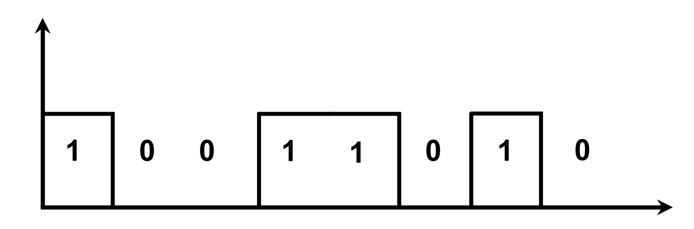


Figure 1.2 Exemple de signal numérique

1.2. Rappels sur les séries et les transformées de Fourier

1.2.1 Introduction

Il y a deux domaines importants de description du signal selon la nature de la variable indépendante :

1. Le domaine *temporel* de la forme s(t) dans lequel la variable indépendante est le temps ' t '. Il s'agit du domaine de description usuelle utilisé pour visualiser l'allure du signal s(t). Dans ce domaine de représentation le signal peut être caractérisé par sa durée, sa période fondamentale, ou son amplitude.
2. Le domaine des *fréquences* de la forme s(f) dans lequel la variable indépendante est la fréquence 'f ' dont la dimension est l'inverse du temps. Dans ce domaine de représentation le signal peut être caractérisé par son spectre, sa fréquence fondamentale ou sa largeur de bande.

Ces deux domaines de description du signal sont reliés entre eux par la transformation de Fourier. Cet aspect dualistique (dualité temps – fréquence) des signaux joue un rôle fondamental en théorie du signal et en électronique où en peut raisonner indifféremment en ' temps ' ou en ' fréquences '.

1.2.2 Série de Fourier

La série de Fourier est fondamentalement liée aux propriétés filtrantes des supports de transmission. La connaissance de la composante fondamentale et du dosage des divers harmoniques est souvent plus utile que la description temporelle du signal par la succession des valeurs qu'il prend dans le temps.

L'idée de base de la série de Fourier consiste à représenter une fonction par une combinaison linéaire d'un ensemble de fonction élémentaire du temps.

Définitions

La série de Fourier est une représentation des signaux périodiques.[3]

---

[3] Rappel : Un signal s(t) est dit périodique s'il existe un certain intervalle de temps T tel que : $s(t)=s(t\pm T)$ (le signal se répète identique à lui-même). La plus petite valeur de T différente de zéro est appelée *période fondamental* dénoté T_0 la quantité $f_0=1/T_0$ est appelée *fréquence fondamental* qui s'exprime en Hertz (Hz).

Un signal périodique s(t) de période $T_0=1/f_0$ peut être décomposé en une somme infinie de fonctions sinusoïdales et cosinusoïdales dites *harmoniques* de fréquence f_0, $2f_0$, $3f_0$,……,nf_0,….multiples de la fréquence fondamentale f_0 (décomposition en série de Fourier).

On aura ainsi :

$$\boxed{s(t)=\sum_{n=0}^{n=+\infty} A(n).\cos(2\pi\, n\, f_0 t)+\sum_{n=0}^{n=+\infty} B(n).\sin(2\pi\, n\, f_0 t)}\quad .$$

Série de Fourier en notation *réelle*

$$A(0)=\frac{1}{T_0}\int_0^{T_0} s(t)dt$$

Avec $$B(n)=\frac{2}{T_0}\int_0^{T_0} s(t)\sin(2\pi n f_0 t)dt$$

$$A(n)=\frac{2}{T_0}\int_0^{T_0} s(t)\cos(2\pi n f_0 t)dt$$

Cette série peut également s'exprimer sous forme complexe, on écrit :

$$\boxed{s(t)=\sum_{n=\;\infty}^{n=+\infty} C(n)e^{jn2f_0t}\quad \text{avec}\quad C(n)=\frac{1}{T_0}\int_0^{T_0} s(t)e^{-jn2f_0t}dt}$$

Série de Fourier en notation *complexe*

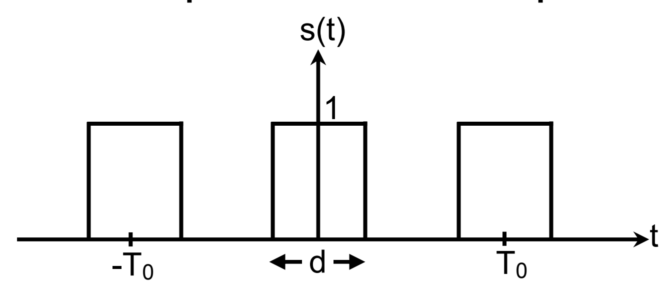
- *On peut aussi prendre :* $\frac{T_0}{2},\frac{T_0}{2}$ *comme borne d'intervalle.*
- A(0) et C(0) sont appelés *composante continue*.
- Les coefficients C(n) sont appelés les *coefficients de Fourier* de la fonction s(t).
- C(n) est généralement un coefficient complexe pouvant se mettre sous la forme $C(n)=|C(n)|e^{\varphi(n)}$ où $|C(n)|$ et $\varphi(n)$ sont respectivement le module et l'argument de C(n), il sont appelés respectivement *spectre d'amplitude* et *spectre de phase* du signal s(t).
- e^{jn2f_0t} est nommé le n-ieme harmonique (harmonique de rang n).
- $|C(n)|$ et $\varphi(n)$ sont appelée aussi *amplitude* et *angle de phase* de l'harmonique de rang n
- l'harmonique de rang 1, dont la fréquence est celle du signal s(t), est appelé *fondamental* de la fonction.

Remarques **:**

- *Les fréquences négatives,* qui n'ont pas de signification physique directe ; on doit mathématiquement leur présence au développement de la série de Fourier en notation réelle en série complexe. Ces fréquences négatives disparaissent avec l'utilisation de séries de Fourier en notation réelle (n varie de 0 à $+\infty$).

- On remarque que la série de Fourier en notation réel nécessite deux sommes l'une pour le terme en cosinus et l'autre pour le terme en sinus. C'est la raison pour laquel on lui préfère la série de Fourier en notation complexe qui nécessite une seule somme et qui permet un calcul rapide des coefficients C(n).

Exemple d'application : décomposition d'un train d'impulsions



On a : $C(n) = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} (1)\ e^{-jn2f_0 t}\, dt$

Tous calculs effectués on obtient le résultat suivant : $C(n) = \frac{1}{\pi n} \sin(\frac{\pi n d}{T_0})$

En prenant comme variable la fréquence discrète $f=n/T_0=nf_0$ on obtient l'expression suivante : $C(n) = f_0 d \frac{\sin \pi n f_0 d}{\pi n f_0 d} = f_0 d \frac{\sin \pi f d}{\pi f d}\Big|_{f = nf_0} = C(nf_0)$ (Enveloppe de la forme $\frac{\sin x}{x}$ appelée sinus cardinal). La représentation graphique du spectre d'amplitude du signal s(t) est donnée à la figure 1.3.

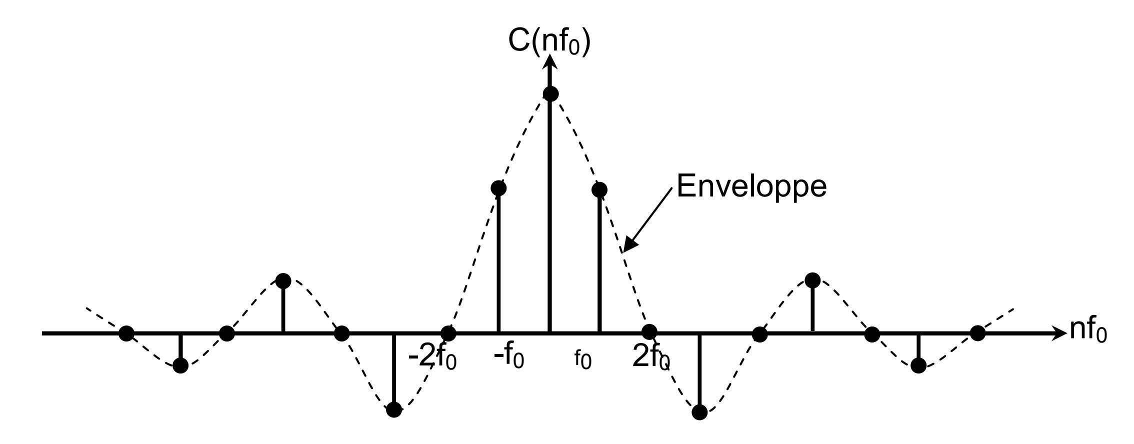


Figure 1.3 les coefficients de la série de Fourier du train d'impulsions rectangulaires

Ce spectre est composé de raies répartis symétriquement de part et l'autre de l'axe vertical (on dit que le spectre est *bilatéral*), l'espacement des raies est fixé par la fréquence fondamentale 'f_0' il s'agit de *spectre discret*. On peut remarquer que les amplitudes des raies décroissent quand leur rang augmente.

1.2.3 Transformée de Fourier

La transformée de Fourier est une généralisation de la série de Fourier appliquée aux signaux non périodique.

Définitions
Un signal s(t) sera défini par une paire de transformée de Fourier, que l'on représentera de la façon suivante : s(t) ↔ s(f) dans les quelles :

$$s(f)=\int_{-\infty}^{+\infty} s(t)\,e^{-2j\pi ft}\,dt \quad \text{et} \quad s(t)=\int_{-\infty}^{+\infty} s(f)\,e^{2j\pi ft}\,dt$$

s(t) est la caractéristique temporelle du signal, l'autre forme c'est à dire s(f) est la caractéristique fréquentiel[4].

La paire de fonction s(t) et s(f) sont dite couple de Fourier.
Par analogie avec la terminologie utilisée pour les coefficients complexe de la série de Fourier, la transformation de Fourier est en général complexe pouvant se mettre sous la forme : $s(f)=|s(f)|\,e^{j\varphi(f)}$. $|s(f)|$ est appelée *spectre d'amplitude* et φ(f) *spectre de phase*. Le spectre d'amplitude et le spectre de phase sont des *spectres continus*.

Exemple d'application : transformé de Fourier du signal porte

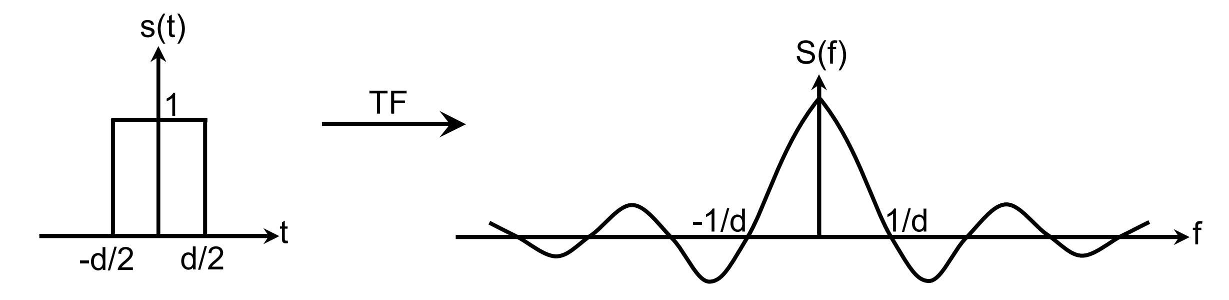


Figure 1.4 La transformée de Fourier du signal porte

Tous calculs faits, on obtient la transformée de Fourier du signal s(t) :
$s(f)=\int_{-d/2}^{d/2}(1)e^{-2j\pi ft}df=d\frac{\sin\pi fd}{\pi fd}$, On constate dans ce cas que s(f) est une fonction réelle, la représentation graphique du spectre d'amplitude est donnée à la figure ci-dessus. La transformée de Fourier ici correspond à l'enveloppe du spectre discret du développement de Fourier : le spectre est *continu*.

1.2.4 Propriétés de la transformée de Fourier

Nous allons considéré dans ce paragraphe quelques propriétés importantes de la transformée de Fourier dont nous aurons besoin dans la suite.

A. Linéarité :

Il en résulte immédiatement de la définition intégrale que :
$TF\{a\cdot s_1(t)+b\cdot s_2(t)\}=a\cdot TF\{s_1(t)\}+b\cdot TF\{s_2(t)\}$ avec a et b des constantes arbitraires.

[4]On écrira parfois s(f) = *TF*{s(t)} 'on lit transformation de Fourier du signal s(t)' et s(t) = TF^{-1} {s(f)} 'on lit transformation de Fourier inverse du signal s(t)'

B. Translation (Décalage temporel et fréquentiel) :

Si $s(f)=TF\{s(t)\}$

Alors :

$$s(t-t_0) \xrightarrow{TF} s(f)e^{-j2\pi ft_0}$$

$$s(t)\,e^{j2\pi ft_0} \xrightarrow{TF} s(f-f_0)$$

Interprétation de ces deux résultats :

1. Lorsqu'un signal s(t) est retardé, ses composantes fréquentielles le sont aussi, *sans modification d'amplitude*. Ainsi le spectre d'amplitude $|s(f)|$ *reste inchangé*, mais $Arg(s(f))=\varphi(f)$ est augmenté de $-2f\pi t_0$ proportionnel a f, donc l'effet d'une translation t_0 sur le signal s(t) est d'introduire un *déphasage* de $-2f\pi t_0$ dans la transformée de Fourier.
2. On a bien évidement $TF\{s(t)\,e^{-j2\pi ft_0}\}=s(f+f_0)$

Donc $TF\{s(t)\cos(2\pi f_0 t\}=\frac{1}{2}\left(s(f+f_0)+s(f-f_0)\right)$

Cette propriété joue un rôle majeur dans les techniques de communication qui constamment transporte le spectre d'une région à l'autre du domaine des fréquences. La modulation des signaux (cf. §2.3.4B) est un exemple familier.

C. Similitude

Si $s(f)=TF\{s(t)\}$

Alors : $s(at) \xrightarrow{TF} \frac{1}{|a|}s(\frac{f}{a})$

Cette propriété importante montre qu'une *dilatation de l'échelle des temps conduit à une contraction de l'échelle des fréquences et inversement*[5]. Il est important de noter que le signal s(at) et la version contracté de s(t) pour $|a|>1$ et qu'il est sa version dilaté pour $|a|<1$.

Ceci correspond à l'idée commune, qu'un signal très bref contient des hautes fréquences. Cela explique en tout cas que les parasites électroniques *brefs* (orage, étincelles électriques) sont entendus dans les postes de radio, leur spectre de fréquences est en effet suffisamment large pour être compris dans la bande passante du filtre d'entée du poste radio.

1.3. Notion de largeur de bande et l'énergie d'un signal

Pour traiter et transmettre correctement un signal s(t), il est impératif de caractériser ce signal par quelques paramètres significatifs. Ces paramètres sont la *largeur de bande* et *l'énergie ou la puissance* d'un signal.

1.3.1 Largeur de bande d'un signal

La notion de spectre permet de définir la largeur de bande d'un signal c'est à dire la plage de fréquence utilisé par le signal.[6] On dira qu'un signal s(t) à une largeur de bande finie (on dit aussi spectre limité ou borné) lorsque son spectre de fréquence est nul en dehors d'un intervalle de fréquence donnée, tel que :

---

[5] On peut le remarquer sur la figure 1.4, plus l'impulsion est étroite (d très petit) plus le spectre est large (1/d très grand) et inversement.

[6] Théoriquement un signal périodique à une largeur de bande infini.

$s(f) \neq 0$ pour $f0<f<f0+B$ la largeur de bande est B.

En pratique, on peut attribuer à un signal une largeur de bande utile en *négligeant les amplitudes au dessous duquel le niveau du signal est très faible* ainsi la largeur de bande désigne *l'intervalle de fréquence à l'intérieur duquel la plus grande partie de l'énergie du signal est distribué*[7] (qui se traduit mathématiquement par : $\int_{f_0}^{f_0+B} |s(f)|^2 \, df \succ h \int_{-\infty}^{+\infty} |s(f)|^2 \, df$; h est un seuil légèrement superieur à 1) .

1.3.2 Energie du signal. Théorème de Parseval

A. Définition de l'énergie d'un signal :

Le signal dans les circuits électriques est généralement une tension ou un courant. L'énergie dissipée pendant une durée de temps donnée dans une résistance R présentant à ces bornes une tension v(t) est simplement :

$$E = \int_{t1}^{t2} \frac{v^2(t)}{R} dt \qquad (A.1)$$

En courant on a : $E = \int_{t1}^{t2} R\, i^2(t)\, dt$ (A.2)

On remarque que l'énergie est dans chaque cas proportionnelle à l'intégrale du carrée du signal. Il est commode le plus souvent de considérer l'énergie normalisée. Dans ce cas, la valeur de la résistance R est égale à l'unité. Ainsi les équations (A.1) et (A.2) auront la même forme. *Il devient alors plus simple de définir l'énergie associé à tout signal par* : $E = \int_{t1}^{t2} s^2(t)\, dt$

L'énergie sur toute la durée du signal est donc :

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} s^2(t)\, dt \qquad (A.3)$$

La forme fréquentielle de ce résultat est donnée par le théorème de Parseval.

B. Théorème de Parseval :

Enoncé : Si $s(f)=TF\{s(t)\}$

Alors : $$\int_{-\infty}^{+\infty} |s(t)|^2 \, dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |s(f)|^2 df$$

Ce théorème important montre que l'énergie E du signal s(t) peut se repartir sur l'axe des temps avec la densité $|s(t)|^2$ et sur l'axe des fréquences avec la densité $|s(f)|^2$.

La quantité $|s(f)|^2$ est appelée *densité spectrale d'énergie* du signal s(t).

---

[7] On peut montré, que 90% de l'énergie transporté par le signal porte (voir figure 1.4) est contenue dans le lobe central (-d/2 , d/2).

Remarque :

Pour un signal périodique, l'intégrale (A.3) ne converge pas. On peut néanmoins définir la puissance d'un signal s(t) périodique de période T_0 par :

$$P = \frac{1}{T_0}\int_{-T_0/2}^{T_0/2} s(t)^2\,dt = \frac{1}{T_0}\int_{-T_0/2}^{T_0/2} s(t)\sum C(n)e^{j2\pi nf_0t}dt = \sum C(n)\frac{1}{T_0}\int_{-T_0/2}^{T_0/2} s(t)e^{j2\pi nf_0t}dt = \sum|C(n)|^2$$ a

ec $|C(n)|$ les coefficients de Fourier de la fonction s(t).

On voit que la puissance P de s(t) est repartie sur l'axe des fréquences aux points nf_0 suivant les valeurs $|C(n)|^2$, c'est pourquoi on appelle *spectre de puissance* l'ensemble des $|C(n)|^2$.

1.4. Filtres linéaires

Dans cette partie, nous nous intéressons tout particulièrement aux notions de filtres linéaires vu leurs importances dans les supports de transmission qui sont en général assimilés à des filtres. Nous définirons la notion de gain qui permet de définir la bande passante d'un filtre.

1.4.1 Définitions

Un filtre linéaire est un système linéaire et invariant dans le temps qui *laisse passer certaines fréquences d'un signal d'entrée et arrête ou atténue les autres fréquences.*

Rappel sur les systèmes linéaires et invariants dans le temps :

La linéarité et l'invariance dans le temps joue un rôle fondamental en traitement du signal et l'analyse des systèmes parce que beaucoup de phénomènes physiques peuvent être modélisés par des systèmes linéaires et invariants dans le temps

- **Linéarité :**

Soit $s_1(t)$ la réponse d'un système à une excitation d'entrée $e_1(t)$ et soit $s_2(t)$ la sortie correspondant à une excitation $e_2(t)$, le system est dit linéaire si :

1. La réponse à $e_1(t) + e_2(t)$ est $s_1(t) + s_2(t)$. [8]
2. la réponse à $a\cdot e(t)$ est $a\cdot s(t)$, où a est une constante arbitraire.

La première propriété est la propriété d'*additivité* et la seconde propriété est la propriété d'*homogénéité* des systèmes linéaires. Ces deux propriétés peuvent être rassemblées en une seule propriété :

$$a_1e1(t) + a_2e_2(t) \rightarrow a_1s_1(t) + a_2s_2(t)$$

- **Invariance dans le temps**

Un système est invariant dans le temps si à un retard du signal d'entrée correspond un signal de sortie ayant subi le même retard :

$$e(t - t_0) \rightarrow s(t - t_0)$$

En numérique, si l'entrée est décalée de quelques coups, la sortie est décalée d'autant.

1.4.2 Gain du filtre, bande passante

Soit e(t) le *signal d'entée* d'un filtre et soit s(t) son *signal de sortie*. Si les transformées de Fourier e(f) et s(f) des signaux d'entrée et de sortie existent. Alors *la fonction de*

[8] Nous supposerons que nous pouvons étendre cette somme à un nombre infini de termes.

transfert G(f) est, par définition le quotient de la transformée de Fourier du signal de sortie du filtre sur celle du signal d'entrée :

$$G(f) = \frac{s(f)}{e(f)}$$

La fonction de transfert *caractérise* le filtre linéaire dans le domaine fréquentiel. La fonction de transfert est généralement une grandeur complexe qui peut se mettre sous la forme : $G(f) = |G(f)|\, e^{j\varphi(f)}$ où $|G(f)|$ et $\varphi(f)$ sont respectivement le *gain* et le *déphasage* du filtre.

Selon le type de filtre, le gain pourra correspondre à une amplification ou à un *affaiblissement appelé aussi atténuation* (c'est le cas des supports de transmission).

On définit le *gain en décibels*[9] ' G_{dB} ' par $G_{db} = 20\log_{10}|G(f)|$. On introduit l'*atténuation (l'affaiblissement)* dans le cas où le gain est inférieur à 1 comme l'inverse du gain, $A = \frac{1}{G}$ soit en dB $A_{dB} = -G_{dB}$.

Remarque:

On peut également introduire la notion d'une fonction de transfert liant deux puissances, lorsqu'on s'intéresse à l'affaiblissement en puissance, on définit alors le l'affaiblissement en puissance en décibels par $10\log_{10}\frac{1}{|G(f)|^2}$.

Bande passante (Bandwidth):

Nous appelons bande passante d'un filtre, la plage de fréquence où son gain est non nul est généralement très étendue. *Cependant le gain s'atténue assez rapidement et peut être considéré comme nul au delà d'une certaine fréquence*. Dans la pratique pour avoir une estimation même grossière de la bande passante on utilise couramment la notion de *bande passante à 3dB (*car 3décibel correspondent à *la bande de fréquences dans laquelle la puissance du signal reçu est au pire égale à la moitié de la puissance du signal émis, comme le montre la figure 1.5)*

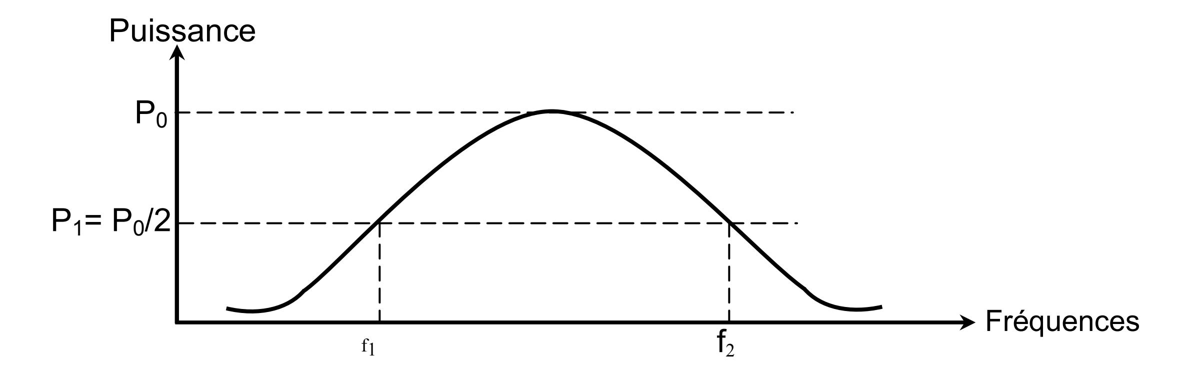


Figure 1.5 Bande passante à 3dB

La bande (f_1, f_2) est appelé la bande à 3dB : $10\log\frac{P_0}{P1} = 3dB$

[9] Historique: Cette unité fut introduite par Alexandre Graham Bell (1847-1922) qui a inventé le téléphone.

1.4.3 Distorsions linéaires

Un filtre est sans *distorsion linéaire (on dit aussi que le filtre à une transmission sans déformation)* lorsque le signal de sortie s(t) à la même forme que le signal d'entrée e(t) à une constante multiplicative K près, on a donc :

$$s(t) = K\, e(t - t_0)$$

Les propriétés d'un filtre sans distorsion linéaire sont facilement déterminées en examinant le spectre du signal de sortie. En effet, la transformée de Fourier du signal de sortie est :

$$s(f) = K\, e(f)\, e^{-j2\pi f t_0}$$

La fonction de transfert du système est : $G(f) = \frac{s(f)}{e(f)} = K e^{-j2\pi f t_0}$

En considérant que le spectre du signal d'entrée est limité à la bande de fréquence (f_1, f_2), *le filtre est sans distorsion si* :

- Le gain $|G(f)|$ est *constant* dans la bande de fréquence (f_1, f_2) : $|G(f)| = K$.
- La phase φ(f) est une fonction décroissante de ' f ' dans la bande de fréquence (f_1, f_2) : $\varphi(f) = e^{-j2\pi f t_0}$. Il est à noter que la phase est *linéaire* par rapport à la fréquence ' f ' (proportionnelle à la fréquence ' f '). En *pratique* ceci se traduit par un *retard du signal reçu* par rapport au signal émis.

Lorsque la première condition n'est pas vérifiée on dit qu'il y a *distorsion d'amplitude*, et lorsque la deuxième n'est pas vérifié on dit qu'il y a *distorsion de phase*.

1.4.4 Les différents types de filtres

Les filtres peuvent être classés en trois classes suivant les valeurs de la bande passante. Trois types de filtres (parfaits) ont été définis : les filtres passe bas, les filtres passe haut et les filtres passe bande.

A. Les filtres passe bas (low pass)

Les filtres passe bas se caractérisent par la courbe représentée en coordonnées semi logarithmique de la figure 1.6.

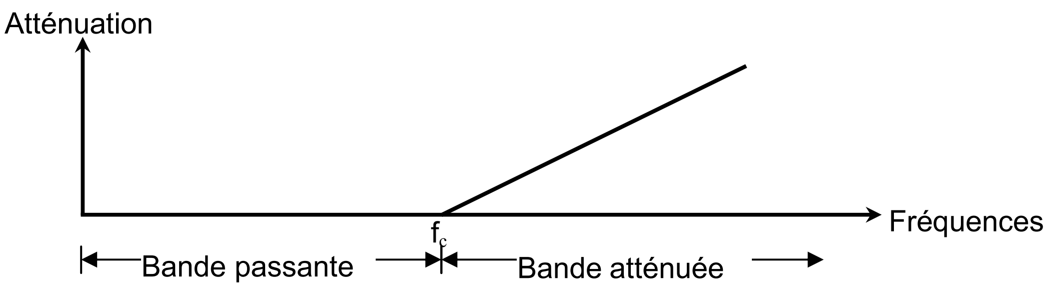


Figure 1.6 Courbe d'atténuation d'un filtre passe bas

Sur la courbe d'un filtre passe bas, nous voyons que l'atténuation est nulle dans toute la bande passante, puis le signal est atténué exponentiellement au-delà de la fréquence ' f_c '. Le signal sera d'autant plus atténué que sa fréquence est loin de la fréquence ' f_c ' appelée *fréquence de coupure (cut off)*.

B. Les filtres passe haut (high pass)

Pour ce type de filtre, l'atténuation est nulle au delà de la fréquence de coupure alors qu'elle est maximale pour les basses fréquences. Nous obtenons la courbe d'atténuation de la figure 1.7.

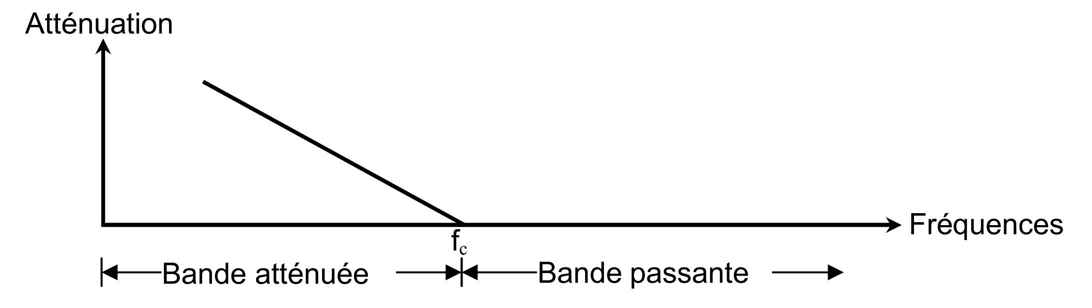


Figure 1.7 Courbe d'atténuation d'un filtre passe haut

C. les filtres passe bande (band reject ou band stop)

Les supports de transmission sont en général assimilés à des filtres de ce type. Les filtres passe bande sont la combinaison des deux types de filtres précédents. Ils possèdent donc deux fréquences de coupure et deux bandes atténues. Il sont caractérisés par la courbe de la figure 1.8

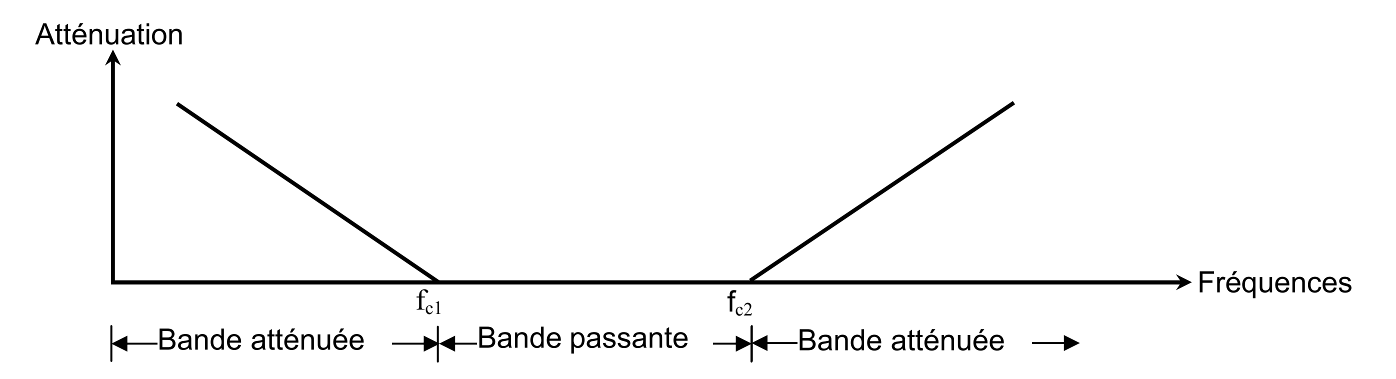


Figure 1.8 Courbe d'atténuation d'un filtre passe bande

2 Transmission de données

2.1. Introduction

La transmission de données entre un émetteur et un récepteur[10] suppose que soit établie une liaison sur un *support de transmission* (appelée aussi *voie de transmission* ou *canal*) munie d'équipement de transmission à ses extrémités.

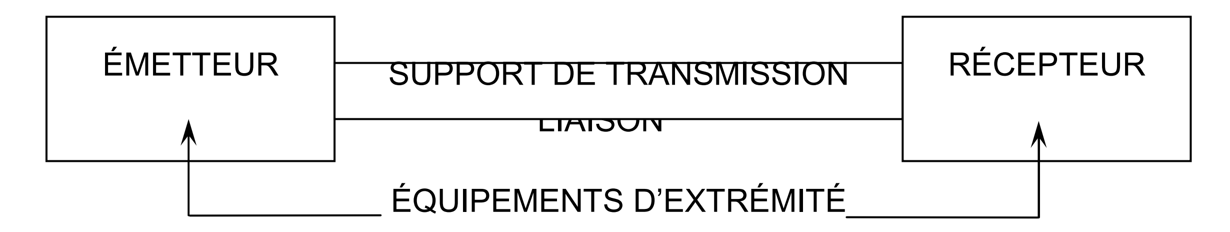


Figure 2.1 Schématisation d'un système de transmission.

Émetteur et récepteur sont désignes communément par les termes *ETTD* (Equipement Terminal de Traitement de Données) ou *DTE* en anglais (Data Terminal Equipement) terme normalisé désignant un équipement informatique connecté à un canal de transmission (ça peut être un ordinateur, un terminal ou autres).

Le terme *support de transmission* désigne le support physique qui permet de transporter les informations d'un appareil à un autre, il peut y'avoir différents types de supports de transmission de nature très divers : ligne téléphonique, câble coaxial, fibre optique, atmosphère et autres. Ces moyens de transmission ont des *caractéristiques* spécifiques et impliquent des *contraintes* à leur utilisation que nous rappelons brièvement. Nous analysons ensuite les *techniques de transmissions* utilisées dans les réseaux informatiques.

Il est possible de partager un même canal pour plusieurs liaisons, les équipements nécessaires seront étudies dans le paragraphe 2.3.5. Le dernier paragraphe est consacré à la protection contre les erreurs de transmission, traite essentiellement des façons de coder les informations à échanger pour détecter et éventuellement corriger les erreurs pouvant survenir pendant la transmission.

2.2. Caractéristiques des supports de transmission

L'infrastructure d'un réseau, la qualité de service offerte, les solutions logicielles à mettre en œuvre, dépendent largement des supports de transmission utilisés. Les supports de transmission exploitent les propriétés de conductibilités des métaux (paires torsades, câble coaxial) ou celles des ondes électromagnétiques (faisceau hertzien, fibre optique). Dans cette partie, nous allons passer en revue quelques caractéristiques essentiels des supports de transmission sachant que les possibilités de transmission (débit, taux d'erreurs, distance franchissable,……) dépendent essentiellement des caractéristiques et de l'environnement de celui-ci.

[10] On désigne généralement par le terme émetteur la machine qui envoie les données et par récepteur celle qui les reçoit. Les machines peuvent parfois être chacune à son tour réceptrice ou émettrice (c'est le cas généralement des ordinateurs reliés par réseau).

2.2.1 Affaiblissement

Un canal de transmission atténue (affaiblit) l'amplitude du signal qui le traverse. Le phénomène d'atténuation correspond à une *perte d'énergie du signal* pendant sa propagation sur le canal, est *s'accentue* avec la longueur de celui-ci. La quantité d'énergie perdue dépend très étroitement de la *fréquence du signal* (cf. §1.3.2B) et de la *bande passante du système* (cf. §2.2.3).

On mesure l'atténuation par le rapport $\frac{P_s}{P_e}$ où P_s est la puissance du signal à la sortie du canal et P_e la puissance du signal à l'entée du canal. Il est courant d'exprimer l'atténuation en décibels (dB) sous la forme $10\log\frac{P_s}{P_e}$ (elle est aussi exprimé en décibels par kilomètre).

Remarque :

Dans la plupart des cas, le taux d'atténuation d'un canal est connu et il peut être possible, en associant des amplificateurs correcteurs de compenser l'atténuation des que celui ci atteint une valeur trop grande.

2.2.2 Déphasage

Le déphasage[12], encore appelé distorsion de phase (cf. §1.4.3), implique un retard du signal reçu par rapport au signal émis dû au temps de propagation de ce signal de l'émetteur vers le récepteur.

La figure 2.2 illustre les phénomènes d'atténuation et de retardement subis par un signal de forme sinusoïdale.

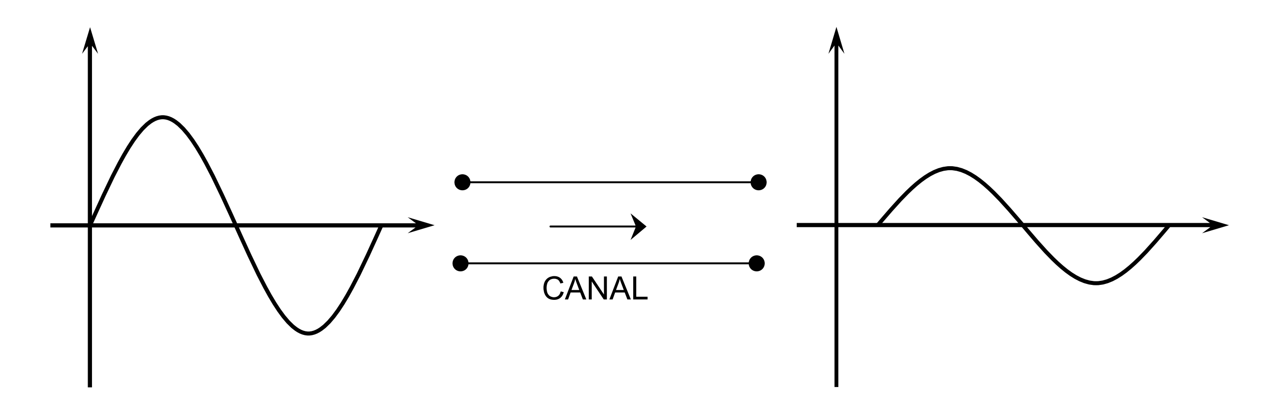


Figure 2.2 Illustration des phénomènes d'atténuation et de retardement subis pour un signal sinusoïdal traversant un canal

[12] Le terme « déphasage » ne concerne en toute rigueur que les signaux sinusoïdaux (la phase est un angle); pour les autres signaux le terme exact est « décalage (temps) » ; mais on a coutume par simplification d'utiliser le terme « déphasage » quelle que soit la forme des signaux :

2.2.3 Bande passante

La largeur de la bande passante est la *caractéristique essentielle* d'un support de transmission, qui se comporte généralement comme un filtre qui ne laisse donc passer q'une bande limitée de fréquence appelée *bande passante* (cf. §1.4.2). Toute fréquence en dehors de cette bande sont fortement affaiblie.

Exemple : une ligne téléphonique ordinaire ne laisse passer que les signaux de fréquence comprise entre 300Hz et 3400Hz. Au dehors de cette bande les signaux sont fortement atténuée et ne sont plus compréhensible, on dit alors que la bande passante d'une telle ligne est de 3400–300 Hz soit 3100Hz. Par contre un câble coaxial utilisé dans les réseaux locaux a une bande passante nettement supérieur dont la largeur est de l'ordre des centaines de *MHz* (300 à 400 MHz).

Il est important de noter que lorsqu'on parle de bande passante W (en Hz), on indique une longueur d'intervalle sans préciser les bornes de cet intervalle.

Remarque :

Nous savons d'après le théorème de Fourier qu'un signal rectangulaire se compose d'un nombre infini de fréquence. Un support de transmission, caractérisé comme on a vue précédemment par une bande passante limitée, ne peut donc en aucun cas transmettre fidèlement un tel signal et celui-ci ne peut être transmis qu'ampute de ses fréquences se trouvant en dehors de la bande passante du canal. On montre cependant que pour garantir une transmission correcte du signal, il n'est pas nécessaire que le canal transmette fidèlement toutes les fréquences du signal, mais il suffit qu'il transmette correctement que *la largeur de bande de ce signal*, définie comme étant l'ensemble de fréquences où est localisé l'ensemble de l'énergie du signal (cf. §1.3.1).

2.2.4 Bruit

Le bruit est un *signal perturbateur* provenant du canal lui même ou de son environnement externe. Il est de comportement aléatoire est vient *s'ajouter* au signal véhiculant les informations et provoquer ainsi les *erreurs de transmission* (on va voir dans la dernière partie de ce chapitre comment protéger l'information contre ces bruit).

On distingue généralement deux types de bruit : le bruit blanc et le bruit impulsif.

A. bruit blanc

Le bruit blanc[13] est un bruit dont la puissance est uniformément repartie dans toute la bande passante du canal, il s'agit essentiellement d'un bruit provoqué par l'agitation thermique des électrons dans le conducteur électrique.

B. bruit impulsif

Comme son nom l'indique ce type de bruit est a caractère impulsif, il se présente sous forme de tensions perturbatrices de valeur élevée mais de durée brève. Ces bruits sont très gênants pour la transmission de données, car le signal perturbateur modifie la *forme* du signal reçu à des instants quelconques (aléatoires) telles qu'il se produit des erreurs à la réception. Les sources de bruit impulsif sont nombreuses. On peut citer notamment :

- la diaphonie (crosstalk) est d'une manière générale, *une influence mutuelle indésirable entre signaux utiles transmis sur des conducteurs voisins l'un de l'autre dans l'espace, par exemple dans un même câble.* Cela résulte

[13]On l'appelle blanc par analogie à la lumière blanche qui possède une densité spectrale uniforme. Le concept de bruit blanc n'est permis qu'à travers des systèmes linéaires (cf. §1.4.1).

principalement d'un couplage inductif dû au champ magnétique de l'une des lignes sur l'autre et réciproquement[14].

- Les brusques variations de courant sur les lignes d'alimentations électriques.
- Phénomènes atmosphériques, solaires, ou autres.

Notion de rapport signal sur bruit

La quantité de bruit présente sur un canal de transmission, est exprimé par le rapport de la puissance du signal transmis sur la puissance de bruit et prend le nom de *rapport signal sur bruit*, nous écrivons ce rapport $\frac{S}{B}$ et on a coutume de l'exprimer sous la forme $10\log\frac{S}{B}$ en décibels (dB). Ce rapport varie dans le temps, puisque le bruit n'est pas uniforme, toutefois on peut en estimer une valeur moyenne sur un intervalle de temps. Le rapport signal sur bruit est aussi une caractéristique d'un canal de transmission.

2.3. Techniques de transmission du signal numérique

2.3.1 Le codage

Les réseaux informatiques se fondent sur la numérisation des informations, c'est à dire la représentation des données par des suites de ' 0 ' et de ' 1 '. Ils englobent la transmission de ces données, leur mémorisation dans des mémoires de stockage et enfin leur utilisation. *La première étape* consiste donc à ramener les informations que nous voulons échanger à un ensemble d'informations binaires à l'aide de techniques de codage. Pour cela, on utilise des codes, qui font correspondre à chaque caractère une suite précise d'éléments binaires ou bit (abréviation universellement reconnue de « binary digit »). La longueur du code va dépendre du nombre de caractère que l'on veut représenter, on sais par exemple qu'avec deux éléments binaires, on peut obtenir quatre configuration (00,01,10,11) susceptibles de coder quatre caractères. En généralisant un code à ' n ' éléments binaires permet de représenter 2^n caractères distincts.

Plusieurs codes ont été normalisés afin de rendre compatibles des équipements informatiques d'origines diverses. Les principaux codes utilisés sont les suivants :

- Code ASCII (American Standard Code Information Interchange) : code à 7 bits, soit 128 caractères disponibles[15].
- Code EBCDIC (Extended Binary Coded Decimal Interchange Code) : est un code de longueur 8 d'origine IBM (International Business Machine) utilisé dans les ordinateurs du constructeur. Ce code autorise jusqu'à 256 caractères.

Après *l'étape de codage* intervient *l'étape de la transmission*, c'est à dire l'envoi des suites binaires de caractères vers l'utilisateur final des ces informations. Pour transmettre ces informations binaires sur un canal de transmission, il est nécessaire de les transformer au préalable en un signal électrique. La méthode la plus simple consiste à représenter l'élément binaire ' 0 ' par une tension V_0 , et l'élément binaire '1' par une tension V_1, Le signal électrique ainsi obtenue prend la forme d'une suite

[14] Parfois, lorsque vous parlez au téléphone, vous pouvez entendre une autre conversation en bruit de fons, c'est typiquement de la diaphonie.

[15] Ce code est très utilisé pour la transmission de données. La plupart des claviers et imprimantes respectent ce code, et il constitue l'alphabet de base des micros ordinateurs de type PC (Personnel Computer). Le code ASCII est représenté en ANNEXE.

d'impulsion (signal rectangulaire) qui donne une correspondance directe entre les informations binaires élémentaires (ou bits) et les impulsions les représentant (on va voir dans le paragraphe 2.3.4A les différents codage (au sens électrique) utilisé pour la transmission des signaux numériques). Un exemple est illustré sur la figure 2.3 avec $V_0 = 0$ et $V_1 > 0$

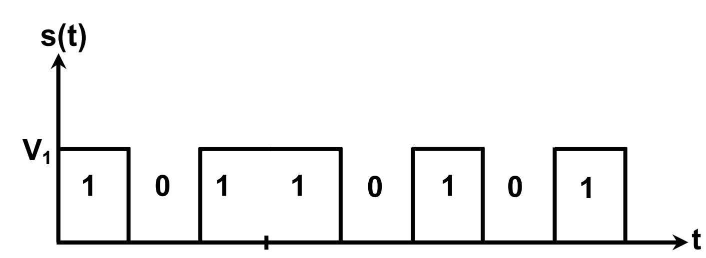


Figure 2.3 Suite d'impulsion représentant la séquence d'information 10110101

Le signal tel que cela est représenté par la figure 2.3 est appelé signal *tout ou rien* (généralement les signaux issus d'un ordinateur sont de ce type).

2.3.2 Mode de transmission et synchronisation

Le transfert d'information entre deux équipements informatiques est effectué en fonction des besoins et des caractéristiques des éléments suivants :

A. Transmission parallèle et transmission série

- **Transmission parallèle**

Pour transférée des données entre deux équipements informatiques, il peut être intéressant notamment lorsque ces équipements sont séparés par une *courte distance*, d'envisager une *transmission en parallèle*[16], cela aura pour effet de réduire le délai de transfert et d'avoir une grande vitesse de transmission (débit). Dans ce type de transmission, les bits sont envoyés sur des fils métalliques distincts pour arriver ensemble à destination, par exemple pour transmettre un octet, on émet huit signaux sur huit fils différents (figure 2.4).

A l'intérieur d'un ordinateur, les données sont manipulées sous une *forme parallèle*, l'unité de donnée la plus courante est l'octet (bloc de 8 bits).

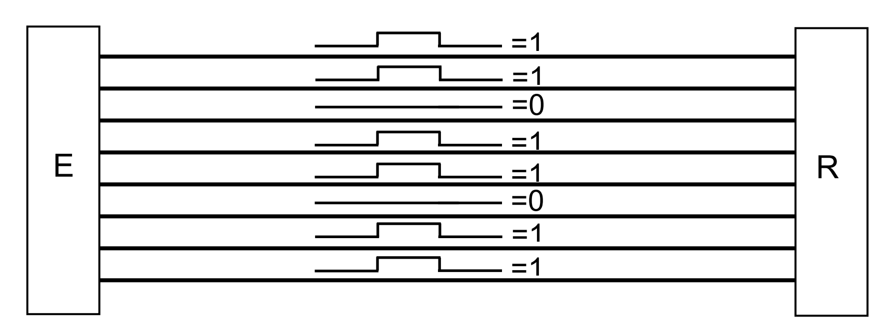


Figure 2.4 Transmission parallèle

[16] L'exemple le plus répandu d'un fonctionnement de ce type est celui du câble parallèle qui relie un ordinateur et une imprimante.

- **Transmission série**

Lorsque la distance séparant les équipements informatiques dépasse quelques mètres, la transmission en parallèle ne peut plus être utilisée, pour des raisons de coût (nombre de fils élevé), mais également pour des difficultés de mise en œuvre inhérente au délai de propagation (retard) qui peut varier d'une ligne à l'autre. On utilise alors la *transmission en série* où les bits sont envoyés *les uns derrière les autres* sur un *unique support de transmission*[17] (la transmission série, est en général utilisé pour les communications à longue distance, c'est le cas des réseaux informatiques car elle est adapté au support de transmission usuel).

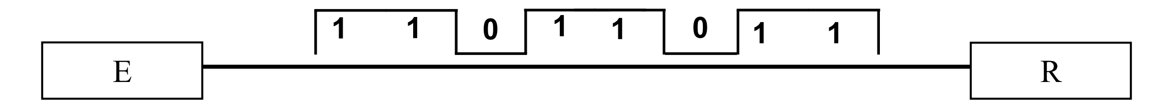


Figure 2.5 Transmission série

A la sortie de l'organe traitant l'information (ordinateur), les éléments binaires se présente en parallèle (par exemple en octet). Toutefois, lorsque ces données binaires arrivent sur un canal de transmission leur signal doit changer, il faut disposer donc d'un appareillage qui réalise la conversion de la forme parallèle à la forme série (ces opérations de conversion sont également mise en œuvre dans des dispositifs physique construit autour de registre à décalage).

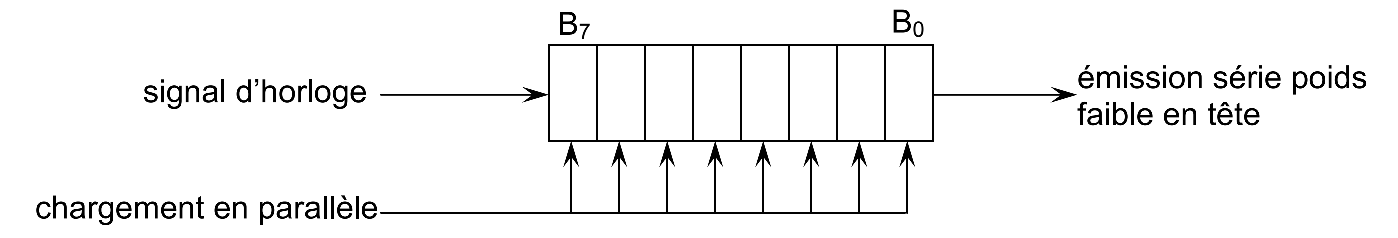


Figure 2.6 Conversion parallèle série

Au rythme d'un signal d'horloge, le registre est décalé d'une position.

A la réception, le processus inverse doit être prévu, les données arrivant en série, il faut les remettre en parallèle pour les traiter. La conversion série parallèle est alors réalisée d'une façon identique avec un registre à décalage.

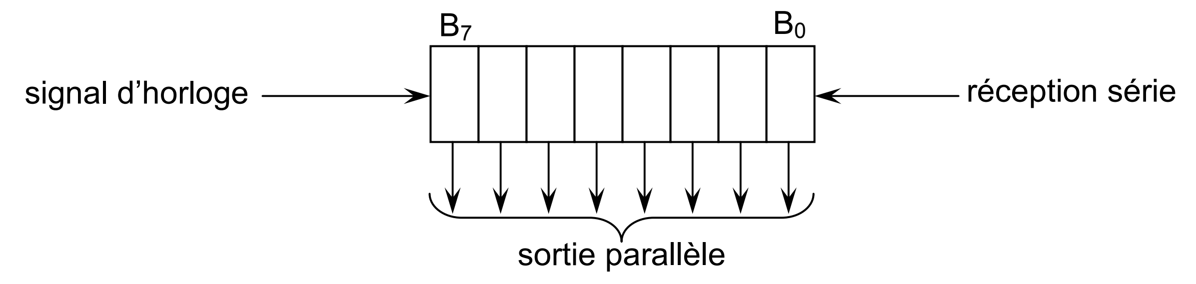


Figure 2.7 Conversion série parallèle

A chaque arrivée d'un bit, les précédant sont décalés d'une position à gauche. Quand le registre est plein, il peut être vidé en parallèle

[17] La succession de caractères peut se faire de deux façons distinctes, en mode synchrone ou en mode asynchrone, sur lesquels nous allons revenir dans le paragraphe suivant.

B. Transmission synchrone et transmission asynchrone

Nous abordons maintenant la question de la *chronologie de l'émission* d'une suite de données, en nous limitant au cas de la transmission série qui présente un intérêt particulier pour notre étude.

- **Transmission asynchrone**

Dans une transmission asynchrone, les caractères sont émis de façon *irrégulière*, comme par exemple des caractères tapés sur un clavier, l'intervalle de temps entre deux caractères est aléatoire, le début d'un caractère peut survenir à n'importe quel moment. Dans les communications entre ordinateurs, comment procède alors un ordinateur expéditeur pour indiquer au destinataire où commence et se termine un caractère particulier, s'il transmet d'une manière asynchrone ? La réponse est donnée par les *bits de départ et d'arrêt* souvent désignés par leur appellation anglo-saxonne de START (élément de départ) et de STOP (élément d'arrêt). Ces bits, sont en fait des signaux encadrent ceux qui constituent un caractère, le bit de départ (START) indique le début d'un caractère et celui ou ceux d'arrêt (STOP) – il peut y'en avoir '1' , '1.5' ou '2' – marquent la fin de caractère. Un octet transmet d'une façon asynchrone est illustré à la figure 2.8.

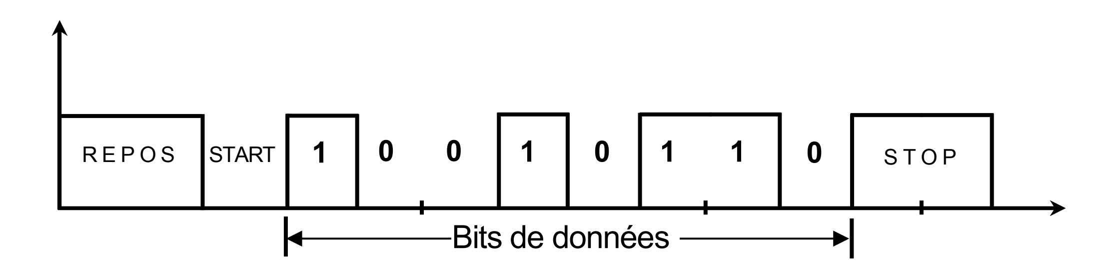


Figure 2.8 Transmission asynchrone

- **Transmission synchrone**

Dans une transmission synchrone, les bits sont émis d'une façon *régulière*, sans séparation entre les caractères, pour cela un signal d'horloge périodique de période T fonctionne pendant toute la durée de l'émission.

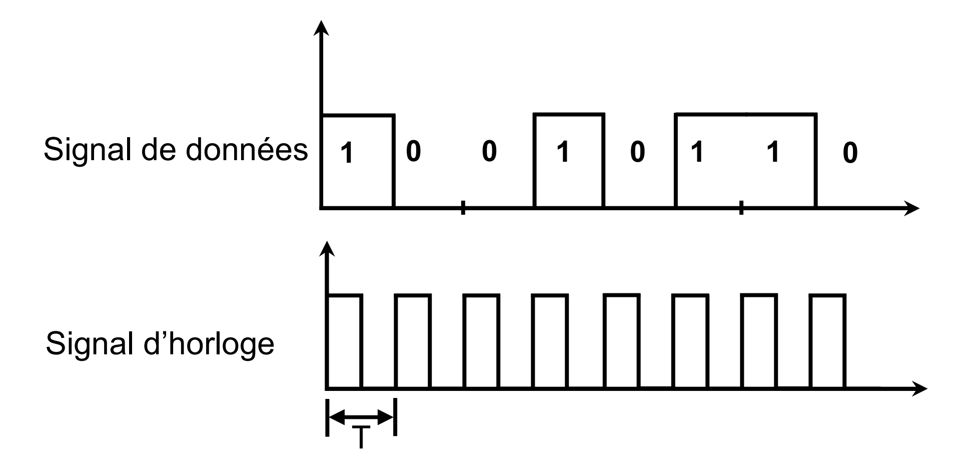


Figure 2.9 Transmission synchrone

- **Comparaison entre le mode synchrone et le mode asynchrone**

Supposons qu'on a un bloc de données de 15000 octets à transmettre.

L'efficacité d'un mode de transmission est mesurée par le nombre de bits utiles transmis sur le nombre de bits réellement émis. L'efficacité noté ' E_{ff} ' est donnée par la relation suivante : E_{ff} = Nombre de bits de données / nombre de bits transmis

L'efficacité dans le mode synchrone correspond : $E_{ff} = \dfrac{1500 \times 8}{1500 \times 8} = 1.$

En mode asynchrone, il faut à chaque octet ajouter 1 bit de START et 2 bits de STOP, soit 11 bits pour 8 utiles. L'efficacité dans ces conditions est : $E_{ff} = \dfrac{1500 \times 8}{1500 \times 11} = 0{,}7$.

Conclusion : la redondance due aux bits START et STOP ajouté pour chaque octet dans la transmission asynchrone, ne permet pas d'atteindre une grande capacité de transmission, et son utilisation est limité pour les systèmes de transmission à bas débit. Par contre le mode synchrone permet des débits plus important que le mode asynchrone. Les réseaux informatiques dépendent de la transmission synchrone.

C. Synchronisation

La transmission d'information sous forme numérique exige, en général un *synchronisme* précis entre l'émetteur et le récepteur. Cette synchronisation est essentielle pour la *reconstitution* des données, et consiste à déterminer les *instants d'échantillonnage*[18] du signal transmis pour reconnaître les bits constituant l'information, c'est ce qu'on appel la *synchronisation bit*, dés que le récepteur reçoit bien les bits d'informations, il doit encore reconnaître les caractères c'est la *synchronisation caractère*.

La synchronisation entre l'émetteur et le récepteur peut être mise en œuvre par différent procédé :

1. Cas d'une transmission asynchrone :

Dans les transmissions asynchrones, l'horloge de l'émetteur et récepteur sont indépendante, la synchronisation des caractères se fait évidement par *reconnaissance* des signaux de départ (START) et des signaux d'arrêt (STOP) qui délimitent chaque caractère. En effet, dans le récepteur le signal START déclenche au début de chaque caractère, la *mise en route* de l'horloge local ayant la *même fréquence* que celle de l'émetteur, et qui permet l'échantillonnage des symboles binaires contenus dans les caractères, assurant ainsi la synchronisation bit.

2. cas d'une transmission synchrone

Dans une transmission synchrone les bits sont *émis* tout les T secondes (période du signal d'horloge de l'émetteur). Pour assurer la *synchronisation bit*, le récepteur doit *reconstituer* le rythme ' 1 / T ' à un décalage près qui a servi à l'émission. On dispose de deux moyens pour y parvenir :

- *Transporter* le signal d'horloge sur un support séparé reliant l'émetteur et le récepteur. Cette technique est utilisée sur des courtes distances.
- La deuxième alternative, très utilisé pour résoudre le problème de synchronisation lorsque l'émetteur et le récepteur sont sépare par des longues distances, consiste à *reconstitué le signal d'horloge à partir du signal reçu,* pour

[18] Échantillonner un signal consiste à mesurer la valeur du signal seulement aux instants significatifs (cf. § 2.3.2D). Toute fluctuation de la détermination de l'instant significatif peut entraîner une erreur d'estimation donc une erreur de transmission.

ce faire il faut transmettre des signaux tels que le récepteur puisse trouver des *nombreuse transitions* même pour des suites de bits identiques[19].

La synchronisation caractère (reconnaissance du début et de la fin d'un groupe de caractère) est réalisée par la reconnaissance d'une suite particulière de bits, *ou* par l'insertion régulier des *caractères de synchronisation* (SYN) dans les données.

D. Notion de débit binaire et de rapidité de modulation

Deux unités sont employées pour caractériser la vitesse de transmission des réseaux et des lignes de communication. La première est le nombre de bits par seconde (ou débit binaire), la seconde est le baud. Pour mieux comprendre les différences entre ces deux notions, nous nous appuierons au préalable sur quelques définitions :

- *Intervalle significatif* : est le temps ' Δ ' pendant lequel une ou plusieurs caractéristiques du signal sont constantes, donc *significatives* d'*un ou plusieurs* éléments binaires (bits). L'intervalle significatif correspond également à l'intervalle de temps compris entre deux *instants significatifs.* Sur la figure 2.9 l'intervalle significatif $\Delta = T$.
- *Instant significatif* : instant choisi pour l'évaluation du signal transmis (l'instant la plus propices est en général celui correspondant au milieu de l'intervalle significatif). Il correspond à *l'instant d'échantillonnage* du signal transmis.

Rapidité de modulation : On appelle rapidité de modulation (baud rate) le *nombre d'intervalle significatif* du signal par unité de temps. Si ' Δ ' est la durée de l'intervalle significatif (exprimé en seconde) la rapidité de modulation noté généralement ' R ' est égale à $\frac{1}{\Delta}$. L'unité de rapidité de modulation est le *baud*[20].

Débit binaire : le débit binaire noté ' D ' est le *nombre d'éléments binaires (bits) émis par seconde sur le support de transmission*. L'unité de débit binaire est le *bit par seconde* (bit/s ou bps). Si ' T ' est le temps d'un bit on aura donc $D = \frac{1}{T}$ bit/s. Exemple, un réseau fonctionnant à 10 Mb/s est donc capable de faire transiter 10 Mb par seconde c'est à dire 10 bits par microsecondes. Le tableau 1 donne les différentes unités de débits.

Notation	*Signification*
1 bit	0 ou 1
1 kbps (k signifie kilo) ou 1 kb/s	10^3 bits par seconde
1 Mbps (M signifie méga) ou 1mb/s	10^6 bits par seconde
1 Gbps (G signifie giga) ou 1 gb/s	10^9 bits par seconde

Tableau 2.1 Les unités de débit

Il est en effet possible de transmettre ' n ' bits pendant un intervalle significatif Δ, pour ce faire il faut que le signal de données ait $V=2^n$ valeurs différentes ($n=\log_2 V$). ' V ' est appelé *valence du signal*.

---

[19] Car il est plus facile au récepteur de détecter une transition (changement de tension), que de reconnaître une valeur absolue de la tension.
[20] Du nom d'Emilie Baudot, inventeur du télégraphe.

Exemple : si la valence ‘ V ‘ du signal est égal à 4, dans ce cas n=$\log_2 4$=2, on transmet donc deux bits par intervalle significatif.

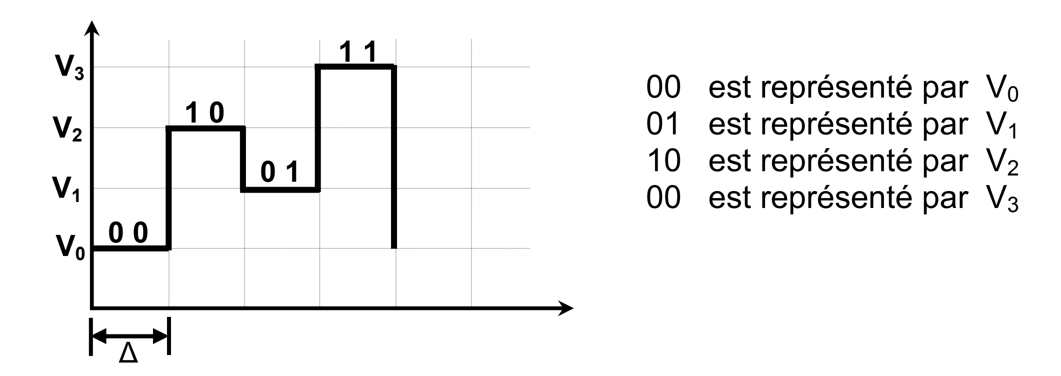


Figure 2.10 Signal à quatre niveaux d'amplitude

Sur cet exemple, on peut voir qu’à une amplitude correspondent deux bits, la caractéristique significative du signal est l’amplitude, si le signal à une amplitude constante pendant Δ , l’intervalle significatif est Δ. Il est clair que le débit binaire D est double de la rapidité de modulation R, donc D=2·R. En généralisent on aura $D=n\cdot R=R\cdot\log_2 V$ exprimé en bit par seconde, dans la quel D est le débit binaire, R la rapidité de modulation et V la valence du signal.

Les deux grandeurs précédents (rapidité de modulation et débit binaire) ont des valeurs identiques lorsque l’on transmet des signaux à deux états (c'est à dire des signaux de valence 2).

Peut on *augmenté indéfiniment le débit binaire* ‘ D ’ en *augmentant la valence du signal transporté* ? La réponse est négative. On ne peut pas augmenter indéfiniment le débit binaire ‘ D ’ car la valence du signal augmente d’autant plus, et le récepteur aura des difficultés à différencier les différentes tensions du signal en tenant compte des bruits qui viennent se superposer à l’information[21].

En 1948, Claude Shannon a démontré qu’un canal de transmission avait une *capacité maximale* exprimée en bits par seconde.

La capacité maximal d’un canal soumis à un bruit est donnée par la formule de Shannon comme suit :

$$C = W\log_2(1+\frac{S}{B})$$

Où : W est la bande passante du canal de transmission exprimé en Hz.

$\frac{S}{B}$ rapport signal sur bruit en dB (cf. 2.2.4).

Il faut toutefois noter que la limite de Shannon est purement théorique. Dans la pratique il est très difficile de s’approcher de cette limite.

[21] Une autre réponse peut être donnée à cette question en exploitant les propriétés de la transformée de Fourier. On a D=1/T bps, en augmentant le débit binaire D, on diminue T ce qui a pour effet d’après la propriété de similitude (cf. § 1.2.4) une dilatation du spectre du signal vers les hautes fréquences et à cause de la limitation de la bande passante du canal, la plus grande partie des harmoniques situés en dehors de la bande passante ne seront pas transmise, et le signal risque d’être inexploitable pour le récepteur. Il ya donc un *compromis à trouver* entre le *débit le plus grand* possible, et *une forme du signal* suffisamment fidèle pour être reconnu du récepteur.

Pour en terminer avec les modes de transmission voyant maintenant les différents modes d'exploitation d'un canal de transmission.

2.3.3 Modes d'exploitation d'un support de transmission (sens d'information)

L'exploitation d'un canal de transmission peut s'effectuer suivant différents modes qui sont :

- *Mode simplex* : dans ce mode, une seule extrémité émet et l'autre reçoit (transmission unidirectionnelle). Ce type de transmission est utilisé dans la diffusion radio et TV par exemple. Ce mode pressente l'inconvénient de ne pas savoir si tout a été reçu par le destinataire sans erreur.
- *Mode semi duplex (half duplex)* : ce mode, appelé aussi bidirectionnel à l'alternat, permet une transmission dans les deux sens, mais alternativement. Chacune des deux extrémités reçoit et émet à tour de rôle, jamais simultanément. L'exemple le plus typique est la conversation par « talkie/walkie », l'utilisateur est à l'écoute et il doit couper l'écoute s'il désire parler. Par rapport aux transmissions simplex, il est nécessaire de disposer de transmetteur (émetteur) et récepteur aux deux extrémités
- *Mode duplex (full duplex)* : ce mode, appelé aussi bidirectionnel simultanés permet une transmission dans les deux sens en même temps, comme si deux interlocuteurs parlaient simultanément, en supposant que chacun entend et parle en même temps. Comme exemple, citons le téléphone. Cette technique nécessite l'utilisation de deux voies de transmission, une pour l'émission, l'autre pour la réception. Notons toutefois qu'une liaison full duplex peut être multiplexé (cf. §2.3.5).

Nous avons représenté ces divers modes à la figure 2.11

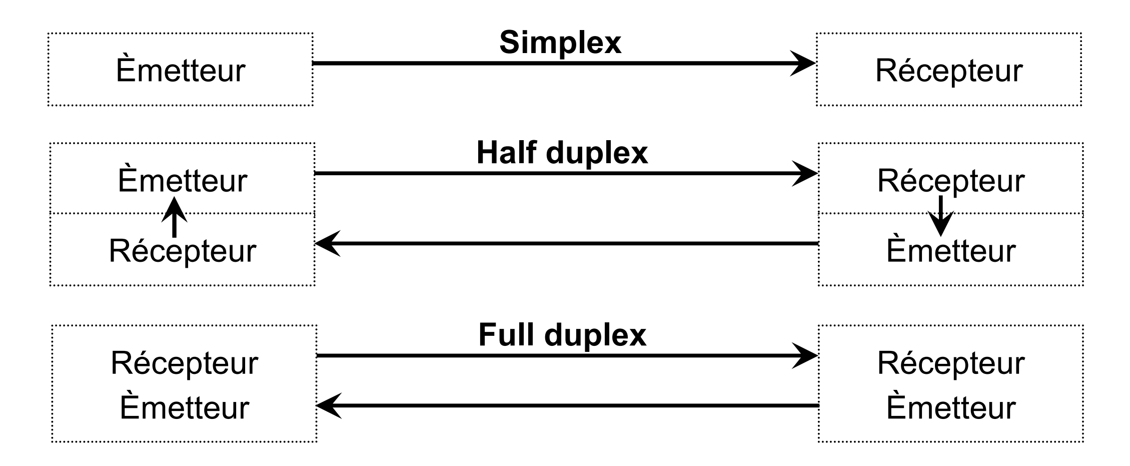


Figure 2.11 Les sens de transmission

2.3.4 Les transmissions dans les réseaux

Pour transmettre des informations binaires sur un support de transmission, il est nécessaire de le transformer au préalable en un signal électrique mieux adapté aux contraintes physiques du système de transmission. Les réseaux informatiques présente la particularité de demander de très hauts débits, de plusieurs mégabits par seconde. Dans ce contexte, deux technique de transmission sont envisageable : la

transmission dite en mode de bade qui n'effectue qu'une simple transformation du signal, et la transmission qui réalise une translation du spectre (modulation).

A. Transmission en bande de base

La transmission en bande de base (base band) *typique de la plupart des réseaux locaux*, consiste à transmettre directement les signaux numériques sur le support de transmission. La figure 2.12 résume le principe de la transmission en bande de base.

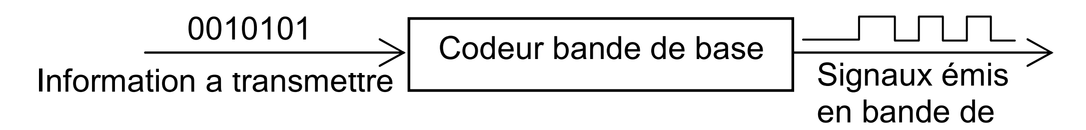


Figure 2.12 Principe de la transmission en bande de base

Le Codeur bande de base, à essentiellement pour objet :

- De *transformer le signal numérique en un autre*, à fin que le spectre du nouveau signal soit mieux adapté aux caractéristiques du support de transmission (de bande passante en particulier)
- De maintenir la *synchronisation* entre l'émetteur et le récepteur.

Un tel procède est simple et non coûteux, mais demande des supports de transmission à grande bande passante.

Remarque :
On appelle codage, l'opération qui fait correspondre à chaque caractère une représentation binaire on l'appel *codage à la source* (cf. §2.3.1), on désigne par transcodage ou *codage en ligne* l'opération qui consiste à représenter les suites binaires par un signal électrique mieux adapté à la transmission. Cette transformation est réalisée par un codeur bande de base (figure 2.12), d'où une possibilité de confusion.

• Les principaux codages en bande de base

Différents codage sont utilisés pour transmettre les données en bande de base :

❖ Le codage NRZ

Le codage NRZ (Non Return to Zéro, non retour à zéro) utilise une tension négative pour représenter un ' 0 ' binaire, et une tension positive pour un ' 1 ' binaire[22]. Donc pour la suite binaire 10011, on trouve les signaux illustrés sur la figure 2.13.

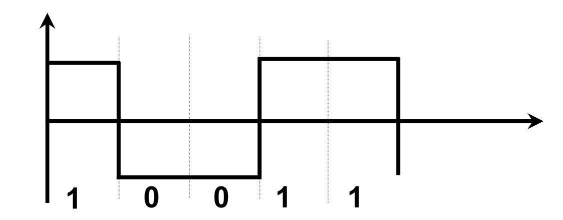


Figure 2.13 Exemple de données binaires codées en NRZ

Un tel codage est mal adapté à un canal de transmission (sa puissance maximal est concentré au voisinage des basses fréquences (voir Annexe) or les supports de

[22] Certaines références définissent le NRZ de façon inverse, c'est à dire représentant le' 0 ' binaires par une tension haute ou positive, et le ' 1 ' binaire par une tension basse ou négative. Cette remarque s'applique pour d'autre code en bande de base.

transmissions *coupent* les très basses fréquences défigurant ainsi le signal). De plus, de sérieux problèmes de *synchronisation* des horloges sont à redouter, puisque le signal sera constant pour une longue suite de bits identiques (cf. §2.3.2C).

❖ **Le codage Manchester et le codage Manchester différentiel**

Le principe de ce codage est de deviser la période de transmission de bit ‘ T ’ en deux intervalles égaux, ainsi chaque période de transmission comporte une *transition* en son milieu, ce qui facilite la synchronisation entre l'émetteur et le récepteur (cf. §2.3.2C) et le spectre du signal a été décalé vers les hautes fréquences par rapport au signal NRZ, mais il s'étale sur une bande double du codage précèdent (cf. Annexe).

Le codage Manchester ou sa version Manchester différentiel est donc bien adapté à la transmission sur un canal à large bande passante et il est utilisé dans la plupart des réseaux locaux et notamment dans les réseaux Ethernet.

- **Codage Manchester**

Avec le *codage Manchester* (appelé aussi le codage biphasé), c'est l*e point où le signal change* qui représente la valeur de bit transmis. Un ‘ 0 ‘ binaire est représenté par une tension allant de bas en haut, tandis que le ‘ 1 ‘ binaire est représenté par une tension allant du haut en bas. La figure 2.14 montre la même suit de bits que le codage précèdent codé en manchester.

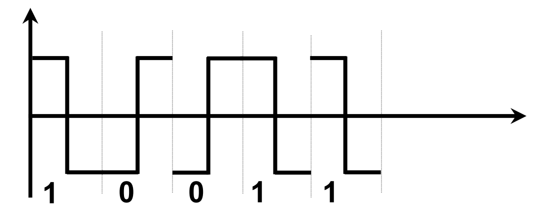


Figure 2.14 Exemple de données binaires représenté en codage Manchester

Le codage Manchester nécessite un repérage des fils de ligne pour éviter de les croiser, et donc d'avoir une réception complémentaires à l'émission, *il faut donc soit* : posséder une prise non symétrique, soit utiliser *le codage Manchester différentiel* (*ce codage à l'avantage d'être indépendant de la polarité et ne nécessite aucun repérage des fils*)

- **Codage Manchester différentiel**

Le codage Manchester différentiel *tient compte du bit précèdent*, comme illustre la figure 2.15. Un ‘ 0 ‘ binaire est représenté par un *changement de tension au début de la transmission*, et le ‘ 1 ‘ binaire est représenté par *l'absence de changement de tension au début de la transmission*.

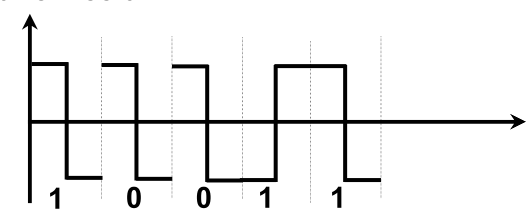


Figure 2.15 Exemple de codage Manchester différentiel

Il existe une *multitude* de signaux en bande de base, *leur différence* se voit essentiellement lorsque l'on étudie leur *répartition de puissance* en fonction de la fréquence (spectre de puissance, obtenue par la transformée de Fourier), leur *sensibilité au bruit* et la *facilité de restitution du signal d'horloge*. Chaque signal est adapté pour telle ou telle support de transmission. Dans l'Annexe on trouve d'autre méthode de codage utilisé dans les réseaux.

- **Limitation de la transmission en bande de base**

Les signaux en bande de base sont sujet à une *atténuation* (cf. §2.2.1) au fur est à mesure de la distance parcouru, ce qui constitue le principal problème de la transmission en bande de base. Si le signal n'est pas *régénéré*[23] très souvent, il prend une forme quelconque, que le récepteur est incapable de comprendre (puisque le niveau logique haut, peut être détecté comme niveau bas si son amplitude devient inférieur à une tension de seuil). Cette méthode de transmission ne peut être utilisé que sur de très courtes distances, la distance maximale d'utilisation dépend essentiellement de la qualité du support utilise, elle est de l'ordre de 5 Km. Sur des distances plus longues, on utilise un signal qui oscille en permanence[24], nommée *porteuse*. Ce signal est de forme *sinusoïdale*[25].

Pour envoyer les données par-dessus ce signal continue, l'émetteur modifie la porteuse de manière à refléter les informations à transmettre, ce type de modification de la porteuse s'appelle *modulation* et ces techniques ont été en usage pour la radio, la télévision, le téléphone, bien avant l'avènement des réseaux informatiques.

B. Modulation discrète

Pour mettre en œuvre l'opération de modulation on utilise (en amont du canal) un organe appelée *modulateur,* à la sortie du canal on utilise un organe effectuant l'opération inverse de la modulation (séparation du signal en bande de base de la porteuse), cette opération s'appelle *démodulation* et l'organe qui l'effectue s'appelle démodulateur. Ces opérations de modulation et de démodulation sont généralement mises en œuvre au sein d'un même organe physique appelé dans ce cas MODEM (MOdulateur DEModulateur). On dit que le MODEM est la liaison entre le monde numérique et le monde analogique.

Il existe plusieurs manières dont une porteuse analogique peut être modulée pour représenter des données numériques :

- **Modulation d'amplitude**

La modulation d'amplitude est employé pour la radio AM (Amplitude Modulation) et peut l'être également pour les réseaux informatiques. Dans cette technique, l'amplitude de la porteuse est modifiée de manière à représenter, à coder, les données. Par exemple, une amplitude élevée peut représenter un ' 1 ' binaire, et une amplitude basse un ' 0 ' binaire. La figure 2.16 montre un exemple de porteuse modulée en amplitude.

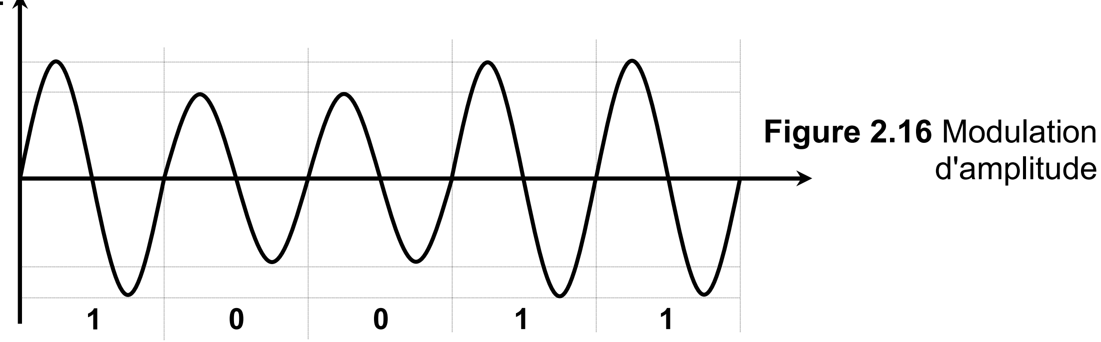


Figure 2.16 Modulation d'amplitude

[23] Cette régénération s'effectue à l'aide de *répéteur,* qui reçoivent les signaux et les mémorisent une fraction de seconde avant de les transmettre sur les lignes sortantes.

[24] Les recherches en transmission du signal ont montré qu'un signal oscillant continuellement se propageait mieux qu'un autre signal, et ce type de signal même affaiblit, peut très bien être détecté par le récepteur.

[25] L'onde porteuse est représenté par ; $p(t)=A_p\sin(\omega_p t+\varphi_p)$ où A_p représente l'amplitude, ω_p la pulsation ($\omega_p =2\pi f_p$, f_p est la fréquence de la porteuse) et φ_p la phase de la porteuse.

La modulation d’amplitude à tendance à être sensible aux *bruits* et n’est pas une technique de modulation très efficace pour les réseaux informatiques, *c’est cependant celle qui est utilise pour transmettre des données numériques sur fibre optique*. Elle est parfois appelée modulation par saut d’amplitude (en anglais ASK, Amplitude Shift Keying)

- **Modulation de fréquence**

La modulation de fréquence consiste à modifier la fréquence de la porteuse pour représenter les données. Par exemple, on associe une fréquence f_0 pour un ‘ 0 ‘ binaire et la fréquence f_1 pour un ‘ 1 ‘ binaire. La figure 2.17 montre un exemple de porteuse modulé en fréquence avec $f_1=2f_0$.

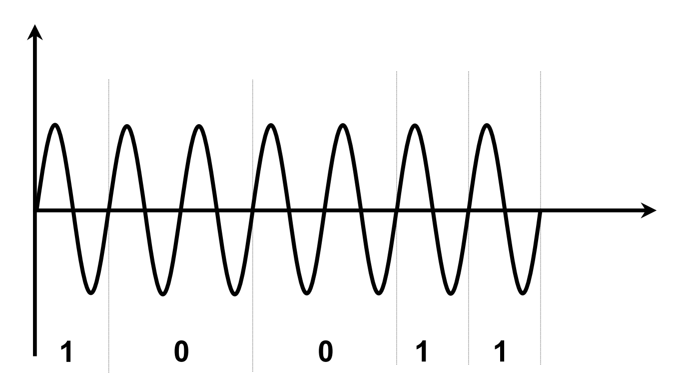


Figure 2.17 Modulation de fréquence

La modulation de fréquence n’est pas aussi sujette aux erreurs que la modulation d’amplitude. Elle est couramment employée dans les transmissions radio (radio FM, Frequency Modulation) et la télédiffusion. Elle est parfois appelée modulation par saut de fréquence (en anglais FSK, Frequency Shift Keying).

- **Modulation de phase**

La modulation d’amplitude et de fréquence utilisent toutes les deux au moins une période complète de la porteuse pour coder un ‘ 0 ‘ ou un ‘ 1 ‘ binaire. Or, si on peut coder plusieurs bits pendant une seule période, le nombre de bits transmis par seconde en serait augmenté d’autant. Cette possibilité à été implanté dans les réseaux informatiques grâce à la modulation de phase, avec cette technique, c’est la phase de la porteuse qui est modifié de manière à représenter les données. La figure 2.18 montre une porteuse avec quatre phases, on peut coder ainsi 2 bits à chaque état. La modulation de phase est également appelée modulation par saut de phase (en anglais PSK, Phase Shift Keying).

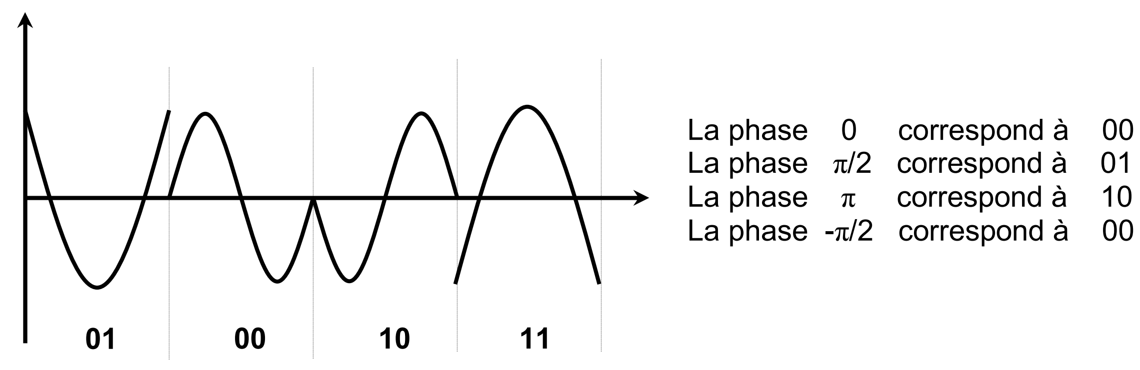


Figure 2.18 Modulation de phase

- **Modulation hybride**

Il est possible de combiner les différents types de modulation que nous venons de présenter à fin de transmettre un nombre important de bits par secondes. Il est ainsi fréquent d'utiliser à la fois une modulation d'amplitude et une modulation de phase[26].

Remarque

Une autre fonction que le MODEM peut faire est d'adapter le signal au canal de transmission en *décalant la largeur de bande du signal de manière à la faire coïncider avec la bade passante (éventuellement avec une sous bande) du canal*, c'est pour cette raison la que la modulation est appelée aussi *transmission par transposition de fréquence*. Ce décalage de largeur de bande du signal peut être obtenue par les techniques de modulation que nous venons de voir.

2.3.5 Multiplexage

Le multiplexage à pour rôle de recevoir des données de *plusieurs émetteurs* par des liaisons spécifiques, pour les transmettre toute ensemble sur une *liaison unique appelé aussi voie composite* (on dit que les données sont *multiplexés*). À l'autre extrémité de la liaison, il faut effectuer la démarche inverse, c'est à dire récupérer à partir des informations arrivant sur la voie composite, les données des différents utilisateurs, et les envoyer sur les bonnes voies de sortie, cette tache nécessite un *démultiplexeur*.

La technique du multiplexage est très utilisée dans les réseaux d'ordinateurs et particulièrement dans le cas des réseaux étendus.

Deux techniques de multiplexages sont principalement utilisées : le multiplexage fréquentiel et le multiplexage temporel.

A. Le multiplexage fréquentiel

Le multiplexage fréquentiel (en anglais FDM, Frequency Division Multiplexing) est utilisé lorsque la bande passante du support de transmission est supérieure à celle nécessaire au signal[27]. Le principe de cette technique, consiste à *partager* la bande passante de la voie de transmission en plusieurs bandes de plus faible largeur, chacune de ces sous bandes passante est affectées à un *émetteur* qui devra donc émettre dans cette bande. Les signaux de chacune de ces bandes sont transmises par un canal unique, ce qui est réalisé par un *multiplexeur*, à la réception un *Demultiplexeur* qui sépare les différents signaux par une série de filtre passe bande (cf. §1.4.4C), les dirige vers leurs destinataires respectifs, aucun adressage explicite n'est nécessaire puisque chaque émetteur est identifié par la bande de fréquences utilisés. Pour assurer une bonne transmission, on laisse une bande de fréquence inutilisée entre chaque sous bande (appelée *bande de garde*), il s'agit essentiellement d'empêcher des *chevauchements* entre signaux appartenant à des bandes voisines.

Les signaux transmise avec cette technique sont du type analogique, les signaux numériques doivent donc être codés à l'aide de MODEM pour être transmise, chaque MODEM doit assurer la translation du signal dans la gamme des fréquences du sous canal utilisé.

---

[26] La plupart des modems utilisés pour l'internent utilisent cette technique.

[27] On utilise le terme de *large bande (broadband)* ou *haut débit* pour caractériser ce type de transmission qui utilise une bande passante assez large.

La figure 2.19, illustre le principe du multiplexage fréquentiel avec une bande passante du canal 300-1400 Hz, devisé en trois sous bandes.

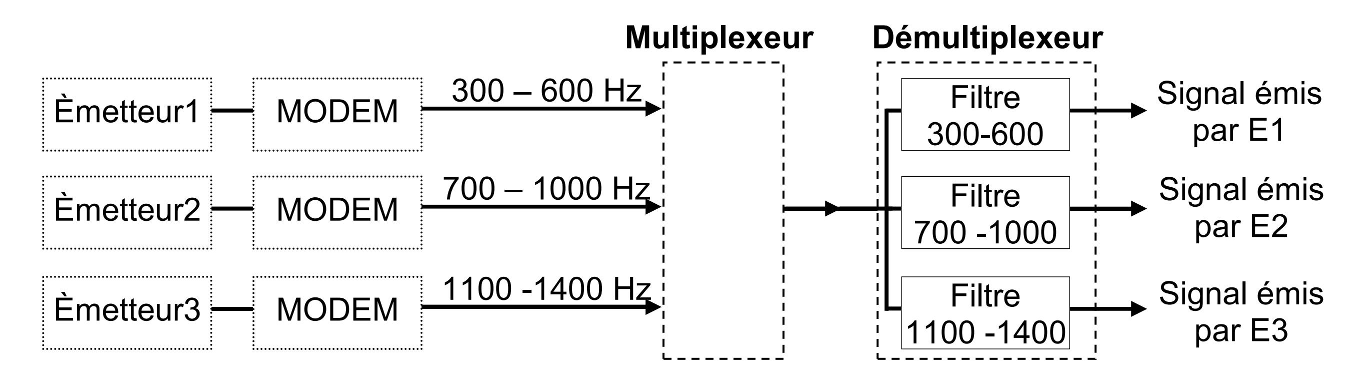


Figure 2.19 Exemple de multiplexage fréquentiel

Remarques

- La transmission en large bande est unidirectionnelle, pour permettre à la fois l'envoi et la réception : soit il faut scindés la bande passante du canal de transmission en deux sous bandes une par direction, ou bien utiliser deux câbles un pour l'émission et l'autre pour la réception, dans chaque cas il faut une pair de multiplexeur/démultiplexeur sur chaque extrémité de la voie. La technologie des réseaux étendus se sert de la transmission à large bande et aussi la transmission par fibre optique qu'utilise un cas particulier du multiplexage fréquentiel c'est le *multiplexage à longueur d'onde* (WDM, Wavelenght Division Multiplexing).
- La transmission en bande de base occupe la totalité de la bande passante du canal, interdisant ainsi l'utilisation du multiplexage fréquentiel.

B. Le multiplexage temporel

Le multiplexage temporel (en anglais TDM, Time Division Multiplexing) suit le même mécanisme que la FDM, mais au lieu de découper la bande passante du support en plusieurs bandes, il *découpe le temps* en tranches qui sont affectées régulièrement à chaque émetteur. On comprend que le multiplexage temporel soit plus efficace que le précèdent, puisqu'il fait une meilleure utilisation de la bande passante. Avec cette technique, les différentes sources émettrices utilisent différents intervalles de temps, c'est à dire qu'elles utilisent le support de transmission en tour de rôle. Selon la méthode d'allocation du temps, on distingue deux types de multiplexage temporel : le multiplexage temporel synchrone (en anglais STDM, Synchronous Time Division Multiplexing) et le multiplexage statistique.

• Le multiplexage temporel synchrone

Dans le multiplexage temporel synchrone, toutes les sources émettrices ont accès au support de transmission durant un intervalle de temps égale même si la source n'est autorisé à émettre. Imaginons par exemple qu'il y'ait trois appareils devant transmettre des données : l'ordinateur A, l'ordinateur B et l'ordinateur C. Le premier à avoir accès au support de transmission est l'ordinateur A, une fois l'intervalle de temps écoulé, il passe le relais à l'ordinateur B, qui peut transmettre ses données pendant une durée identique avant de laisser l'ordinateur C émettre à son tour. *Les données émises durant un intervalle de temps peuvent être devisé en bits, en octet ou autre regroupement.*

Le multiplexage temporel synchrone fonctionne comme un commutateur (voir figure 2.20).

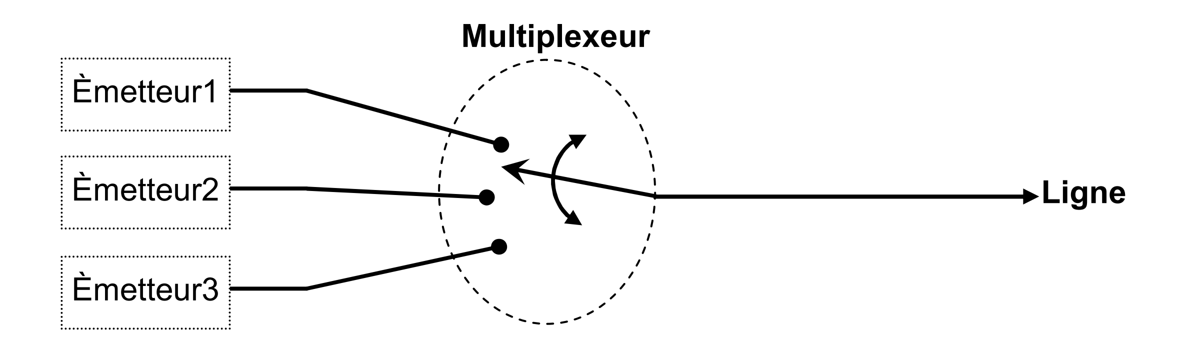


Figure 2.20 Multiplexage temporel

De même que dans le cas du multiplexeur fréquentiel, aucun adressage n'est nécessaire, la position de l'information dans le flot permet d'identifier l'émetteur.

Le multiplexage temporel synchrone présente l'inconvénient que, même si l'ordinateur A et B n'ont aucune données à transmettre, l'ordinateur C doit quand même attendre que leur temps d'émission soit écoulé avant de pouvoir émettre à son tour. Le multiplexage statistique permet d'utiliser plus efficacement le support de transmission lorsqu'une ou plusieurs sources n'ont aucun données à émettre.

- **le Multiplexage statistique**

Le multiplexeur statistique[28], appelé aussi *multiplexage intelligent* (en anglais ITDM, Intelligent Time Division Multiplexing) attribue également un intervalle de temps d'émission à chaque appareil, qui doit attendre son tour pour transmettre, mais lorsqu'un appareil n'a aucune donnée à envoyer, le multiplexeur *saute son tour* et passe directement à l'appareil suivant. *Ces multiplexeurs intelligents sont aussi appelés concentrateur*[29]. La plupart des réseaux informatiques utilisent une forme de multiplexage statistique, car les différents ordinateurs reliés n'ont pas besoin d'envoyer des données en permanence. Pour être sûr qu'un ordinateur transmettant des données laissera les autres émettre à leur tour, *on fixe une limite supérieur pour la quantité de données pouvant être envoyés en une fois* : on appelle cette quantité maximale *un paquet.*

2.4. Protection contre les erreurs de transmission

Si, entre les deux extrémités d'une liaison, la transmission de données était parfaite, les signaux reçus par l'une seraient tout à fait identiques aux signaux émis par l'autre. Mais on a vue dans le paragraphe 2.2 qu'en plus des imperfections connues du support de transmission (affaiblissement, déphasage), *les données transmises sont perturbés* de façon aléatoire par du bruit. Ces imperfections et ces perturbations se traduiront au niveau de l'information reçu, par des modifications des positions binaires : soit des disparition, soit des adjonctions, soit des inversions (' 0 en 1 ' ou ' 1 en 0 '). L'objet de cette section, est de décrire les méthodes couramment utilisées dans les réseaux informatiques, pour protéger les données émises contre les erreurs introduites par le canal de transmission.

---

[28] Le nom de multiplexeur statistique indique un fonctionnement fondé sur un calcul statistique.

[29] Un concentrateur est un microcalculateur avec programme enregistré, apparu grâce au développement des microprocesseurs.

La technique adoptée dans la plupart des systèmes de détection d'erreurs, consiste à ajouter des *bits supplémentaires (dit redondants)* à chaque bloc de données avant de le transmettre sur le support de transmission. Ces techniques utilise un *codeur*[30] *à l'émission* et un *décodeur à la réception*, comme le montre la figure 2.21.

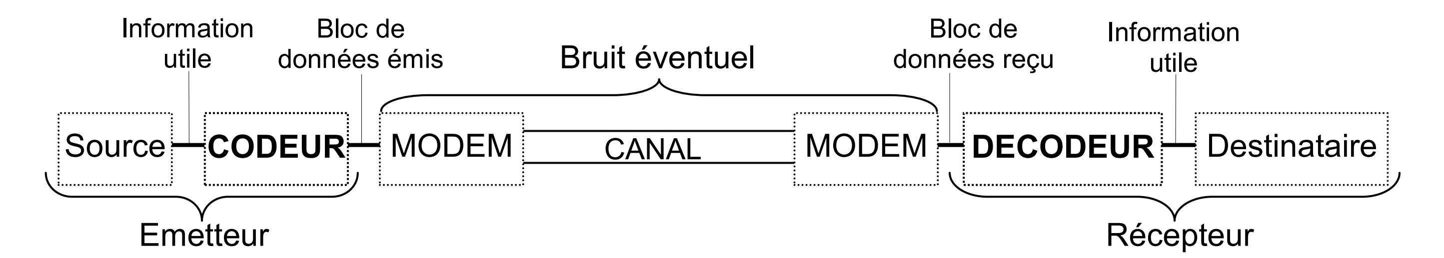


Figure 2.21 Place du codeur et du décodeur[31]

Dans la figure 2.21, l'opération de codage consiste à ajouter des informations de contrôle (informations redondantes) à l'information utile émise par la source, l'opération de décodage devra découvrir et corriger les éventuels erreurs qui seraient produites au cours de la transmission du bloc. Les stratégies d'utilisation du codeur et du décodeur dépendent du type de système de transmission utilisé, cette stratégie est une simple *détection d'erreur* au niveau du récepteur, elle peut avoir pour objet une *correction des erreurs* alors il faut distinguer deux cas, suivant les *possibilités du décodeur* :

- Lorsque le *décodeur corrige lui même* automatiquement certaines erreurs, on dit que la stratégie est une correction d'erreurs directe.
- Lorsque le décodeur *ne peut que détecter des erreurs*, il est nécessaire de retransmettre le bloc de données pour réaliser la correction, on dit que la stratégie est une *correction par retransmission* et on la note ARQ (Automatique Repeat reQuest, procédure de retransmission automatique), cette retransmission peut être de trois types différents comme l'indique la figure 2.22. Nous les décrirons dans le paragraphe 2.4.2.

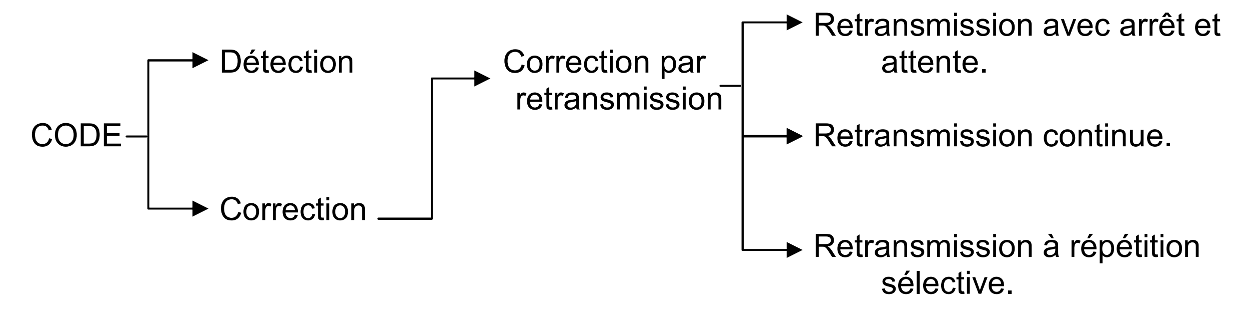


Figure 2.22 Stratégie de protection contre les erreurs

2.4.1 Détection d'erreur

Pour ce type de protection, les bits redondants ajoutées aux données doit être déterminé, de manière telle que le récepteur puisse seulement détecter les erreurs éventuels de transmission, la correction elle, se fera dans une seconde phase par le biais de techniques de retransmission.

[30] A ne pas le confondre avec le codeur bande de base.
[31] Dans le cas d'une transmission en bande de base le MODEM se réduit à un simple codeur-décodeur bande de base.

Les codes de détection d’erreurs les plus courants sont les CRC (Control de Redondance Cyclique) et le control de parité.

A. Contrôle de parité

Il existe *deux types de control de parité* (pair et impair) et il est indispensable que l’émetteur et le récepteur s’entendent sur le type à utiliser pour l’ensemble de la transmission (dans le cas contraire, un grand nombre de fausse alerte risque de se produire). *Avec la parité paire*, si le nombre de ‘ 1 ‘ dans les données envoyées est impaire alors le bit de parité (bit de control) est égal à ‘ 1 ‘ de manière à ce que le nombre total de ‘ 1 ‘ soit pair y compris le bit de parité, et si le nombre de ‘ 1 ‘ est déjà pair alors le bit de parité vaudra ‘ 0 ‘. *Une parité impaire* correspond au système inverse.

Quelque soit la parité choisie, si un bit est modifié au cours de la transmission, les calculs de parité effectués par l’émetteur et par le récepteur différeront. Dans l’exemple du tableau 2.2, la parité choisie est paire, on remarque sur la deuxième ligne l’effet de modification d’un bit dans les données.

Données originales	*Parité de l’émetteur*	*Informations transmises*	*Parité du récepteur*	*Concordance*
0100110	1	0100110 **1**	1	Oui
0100110	1	0*0*00110 **0**	0	Non

Tableau 2.2 Effet de la modification d'un bit avec une parité paire

Cette méthode est essentiellement utilisé dans les procédures de transmissions basés sur les caractères, et elle est peu performante puisqu’il faut ajouter 1 bit pour chaque caractère transmis et ce control fonctionne correctement seulement lorsque le nombre de bits modifiées est impair.

B. Control par redondance cyclique

Pour vérifier la précision d’une transmission, les réseaux recours en général à une méthode de détection d’erreurs appelée CRC (Cyclic Redundancy Check ou Control de Redondance Cyclique). Cette méthode permet de détecter plus d’erreurs que le control de parité.

Le principe de la méthode se présente grosso modo comme suit :

- Soit ‘ $a_0a_1a_2$......... a_n ‘ la séquence d’éléments binaires du bloc de n bits à transmettre[32], et ‘ $r_0r_1r_2$ ……r_k ‘ la séquences de bits redondants qui seront placés dans le bloc de données, dans la *zone de détection d’erreur* appelée aussi *CRC* (nom générique de la méthode) ou *FCS* (Frame Check Sequence) comme le montre la figure 2.23.

Données : suite de bits quelconques $A_0a_1a_2$......... a_n	CRC ou FCS $r_0r_1r_2$ ……r_k
Bloc à transmettre	

Figure 2.23 Structure d'un bloc de bits contenant des informations de détection d'erreurs

[32] Un bloc de donnée est structuré selon des formats standard, et clairement délimité a fin de permettre au récepteur de les reconnaître et de les interpréter.

- On fait correspondre au bloc de données $a_0a_1a_2$......... a_n un polynôme de degré n-1 noté P(x) : $P(x)= a_0 + a_1x+ a_2x^2 +.........+ a_{n-1}x^{n-1}$, même chose pour la zone FCS on lui fait correspondre un polynôme de degré k-1 noté R(x) : $R(x)= a_0 + a_1x+ a_2x^2 +.........+ a_{n-1}x^{k-1}$.

- A l'émission, l'émetteur effectue l'opération suivante $\frac{x^k\,P(x)}{G(x)}$, G(x) est appelle *polynôme générateur,* il est de degré k. Les deux extrémités possèdent le même polynôme générateur. Le reste de cette division correspond au polynôme R(x), les valeurs binaires ' $r_0r_1r_2 \ldots\ldots r_k$ ' sont placé dans le FCS (voir figure 2.23).

- A la réception, le récepteur effectue la division $\frac{x^k\,P(x)+R(x)}{G(x)}$, si le reste de cette division est nul alors le récepteur en déduit que la transmission s'est bien passée. En revanche, si le reste est différent de zéro le récepteur en déduit une erreur dans la transmission : le récepteur demande la retransmission du bloc de donnée.

Remarque : tous les calculs se font en arithmétique binaire.

Exemple d'application :

On désire protéger le bloc de données suivant : '1010010111', le polynôme générateur utilisés pour les deux extrémités est : $G(x)=x^4+x^2+x+1$.

Au données 1 0 1 0 0 1 0 1 1 1

On fait correspondre le polynôme $P(x)= x^9+0+x^7+0+0+x^4+0+x^2+x+1$

On multiplie par x^k le polynôme P(x) où k est le degré du polynôme générateur G(x), dans notre exemple k=4. Le dividende devient :

$x^k\,P(x)= (x^4)\,(x^9+0+x^7+0+0+x^4+0+x^2+x+1) = x^{13}+0+x^{11}+0+0+x^8+0+x^6+x^5+x^4+0+0+0+0$ soit ' 10100101110000 '. On remarque bien, quand on multiplie par x^k le polynôme P(x) revient à ajouter k bits à 0 aux données.

Le polynôme générateur est x^4+x^2+x+1, il lui correspond la séquence binaires $1x^4+0x^3+1x^2+1x+1$ soit ' 10111 '.

On effectue la division $\frac{x^k\,P(x)}{G(x)}$

```
1 0 1 0 0 1 0 1 1 1 0 0 0 0 |  1 0 1 1 1
1 0 1 1 1                   |  1 0 0 1 1 0 0 1 0 0
0 0 0 1 1 1 0 1             |  Ce quotient est sans intérêt
      1 0 1 1 1             |
      0 1 0 1 0 1           |
        1 0 1 1 1           |
        0 0 0 1 0 1 0 0     |
              1 0 1 1 1     |
     Reste = 0 0 0 1 1 0 0  |
```

Le reste de la division est 1100, le FCS est donc ' 1100 '.

Le bloc à transmettre est : ' 1010010111*1100* '.

A la réception, on effectue la division $\frac{x^k P(x)+R(x)}{G(x)}$,

```
      Données        FCS  |
1 0 1 0 0 1 0 1 1 1 1 1 0 0 |  1 0 1 1 1
1 0 1 1 1                 |___________________
0 0 0 1 1 1 0 1           |
      1 0 1 1 1           |
      0 1 0 1 0 1         |
        1 0 1 1 1         |
        0 1 0 1 0 1       |
          0 0 0 1 0 1 1 1 |
                1 0 1 1 1 |
    Reste = 0 0 0 0 0 0 0 |
```

Le reste de la division (Données+FCS) est nul, donc le bloc de donnée a été correctement transmis.

Cette méthode permet de détecter pratiquement toutes les erreurs qui se produisent sur le support de transmission, cependant si une erreur se glisse dans la zone de détection d'erreur (FCS), on conclut à une erreur, puisque le reste de la division ne sera pas le même.

- **Les polynômes générateurs**

Les polynômes générateurs utilisés font l'objet de normalisation. Le degré du polynôme est d'autant plus important que la probabilité d'apparition d'une erreur l'est, ou que la longueur du bloc à protéger est importante. Les principaux polynômes employés sont :

- CRC – CCITT : $x^{16}+x^{12}+x^5+1$, permet de détecter toutes les séquences d'erreurs de longueur égal ou inférieur à 16 bits.
- CRC – IEEE802 : $x^{32}+x^{26}+x^{23}+x^{22}+x^{16}+x^{12}+x^{10}+x^8+x^7+x^5+x^4+x^2+1$, très utilisé dans les réseaux locaux.

2.4.2 Correction d'erreur

La détection d'erreur suivie d'une retransmission est la solution la plus utilisée dans les réseaux informatiques. Des mécanismes *d'accusés de réception* (acquittements) permettent de confirmer à l'émetteur que les données transmises sont bien arrivées sans erreur. Notons que ces accusées de réceptions sont généralement des blocs de données spéciales. Divers types de politiques d'acquittement et de retransmission peuvent être adaptés :

A. Retransmission avec arrêt et attente

L'émetteur transmet le bloc de données (composé de bits de données + FCS) et attend un accusé de réception positif ou négatif :

- Si l'accusé de réception est positif (*ACK*, ACKnowledge), *il émet le bloc suivant*, puis il attend le prochain accusé de réception.
- Si l'accuse de réception est négatif (*NACK*, Not ACKnowledge*), il réémet le bloc à nouveau.*

Cette stratégie est mise en œuvre sur un circuit full duplex ou half duplex (cf. §2.3.3)

B. Retransmission continue

Avec cette méthode, l'émetteur envoie une série de bloc successifs contenant des numéros de séquence sans attendre d'accusé de réception entre deux blocs, il ne s'interrompt que lorsqu'il reçoit un accusé de réception négatif (NACK). Dans ce cas la l'émetteur *retransmet alors le bloc erroné ainsi que les blocs suivant*. Par exemple, si l'émetteur envoie 10 blocs numérotés de 1 à 10, et que le bloc 7 est altéré, le récepteur envoie un accusé de réception négatif pour ce bloc à l'émetteur, qui lui envoie les blocs 7,8,9 et 10.

C. Retransmission à réception sélective

Elle suit le même principe que celui de la transmission continue, sauf dans ce cas lors d'un accusé de réception négatif, seul le bloc erroné est retransmis. Cette stratégie est mise en œuvre seulement sur une liaison full duplex.

Remarque

Quelque soit le type de retransmission, si l'émetteur ne reçoit pas d'accusé de réception après un délai donnée, le bloc non accusé est réémis automatiquement, c'est ce qu'on appelle *retransmission après dépassement de délai d'attente*.

2.4.3 Notion de taux d'erreurs

Dans la pratique, on mesure la qualité d'une liaison numérique (qualité de transmission) par le taux d'erreur appelée BER (Bit Error Rate), il est donnée par le nombre de bits erronées rapporté au nombre total de bit transmis.

$$T_e = \frac{\text{nombre de bits erronées}}{\text{nombre de bits transmis}}$$

Le taux d'erreurs varie en pratique de 10^{-4} (ligne téléphonique) à 10^{-9} (réseaux locaux). Le taux d'erreurs est devenu très satisfaisant descendant souvent sous la barre des 10^{-9} et cela provient de techniques de codage plus performantes et de l'utilisation de support de transmission de très bonnes qualités comme la fibre optique.

3 Conclusion

Nos avons dans le présent chapitre, examiné les différents types de signaux susceptibles de véhiculer des informations binaires sur des supports de transmission usuels. Nous avons également examiné les caractéristiques de ces supports et nous nous sommes attardés sur leur défauts et limitations. Nous avons ensuite abordés les techniques d'adaptation des signaux à ces support de transmission y compris les différents techniques de synchronisation entre l'émetteur et le récepteur ainsi que les fonctions de control d'erreur.

Les différentes notions abordées dans ce chapitre ont pour objectif de cerner les problèmes inhérents à la transmission physique des informations binaires, à fin de mieux comprendre l'utilité de certains organes et fonctions utilisés sur les réseaux.

4 Références bibliographiques

- *Fondements du traitement du signal* — Rais El Hadi Bekka — OPU — 1998.
- *Cours d'automatique. Signaux et systèmes* — Maurice Rivoire et Jean Louis Ferrier — Edition Eyrolles — 1994.
- *Réseaux téléinformatiques* — LORRAINS — Edition Hachette technique — 1979.
- *La communication dans les réseaux d'ordinateurs. Principes et exigences* — Mohamed Bettaz, Lewis M.Mackenzie — OPU — 1993.
- *Téléinformatique, transport et traitement de l'information dans les réseaux et systèmes téléinformatiques et télématiques* — César Macchi, Jean-François Guilbert et 13 coauteurs — Edition Dunod — 1987.
- *Réseaux. Cours et exercices. 3eme édition* — Andrew Tanenbaum — Edition Dunod — 1994.
- *Les réseaux. Edition 2003* — Guy Pujoll — Edition Eyrolles — 2003.
- *Architecture et technologie des ordinateurs. 3eme édition* — Paolo Zanella et Yves Ligier — Edition Dunod —
- *Réseaux* — Ed.Tittel — Edition Schaum's — 2003.
- *Télécoms 1. De la transmission à l'architecture des réseaux. 2eme édition* — Claude Servin — Edition Dunod — 2000.